



Filipe Miguel dos Santos Lavareda Dionisio

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Sistema de deteção e diagnóstico de avarias em tempo real para motores de indução, baseado num referencial de correntes 3D

Dissertação para obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins ,
Prof. Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Pedro Miguel Ribeiro Pereira

Arguente: Prof. Doutor Vitor Manuel de Carvalho Fernão Pires

Vogal: Mestre Rui Dias Jorge



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2015

Sistema de deteção e diagnóstico de avarias em tempo real para motores de indução, baseado num referencial de correntes 3D

Copyright © Filipe Miguel dos Santos Lavareda Dionisio, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

"Pedras no caminho?

Guardo todas, um dia vou construir um castelo..."

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar aqui registado o meu sincero obrigado a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para o meu sucesso nesta tarefa.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor João Martins pela sua disponibilidade, pelos sábios conselhos que me foi dando ao longo do percurso e pela forma exemplar como orientou o meu trabalho.

Quero também agradecer ao Engenheiro Rui Dias Jorge pela disponibilidade demonstrada e pelos recursos que me disponibilizou. Ao meu grande amigo, o Engenheiro João Peres, um enorme obrigado pela paciência e pela importante ajuda que me ofereceu na resolução dos problemas que foram aparecendo na TPU.

Ao meu grande amigo Miguel Marques e ao André Águas, pela disponibilidade e por me terem integrado no tema da dissertação fica o meu sincero agradecimento.

Ao Marco, ao Di, ao Raka, ao Bolos, ao Bravo, ao Johny e a todos os outros grandes amigos que fui fazendo ao longo destes cinco anos de FCT, quero agradecer por toda amizade e por me terem dado a mão durante toda esta caminhada, sem eles tudo teria sido mais difícil.

Não posso também deixar de agradecer aos meus colegas de laboratório, em especial ao Horácio, pela preciosa ajuda que me deram nesta reta final do meu percurso.

À minha família, em especial ao meu Pai e aos meus avós, quero agradecer por serem um importante pilar na minha vida, por terem feito de mim o Homem que hoje sou, pelo incentivo que me deram ao longo destes anos, por todo o apoio e por todas as condições que me ofereceram e que fizeram com que chegasse até aqui.

Por último mas não menos importante, ao meu grande amigo Paulo Gomes, por tudo aquilo que me ensinou e por ter feito de mim parte daquilo que sou hoje, um obrigado muito especial. Sem ele o meu percurso até aqui não teria sido possível.

RESUMO

Na indústria moderna onde as máquinas elétricas assumem um papel cada vez mais importante, é o motor de indução aquele que desempenha as mais diversas funções sendo na maioria das vezes preferido em detrimento da máquina síncrona e de corrente contínua. Por ser tão importante, é necessário garantir a continuidade e a segurança dos seus processos, nesse contexto a manutenção preventiva desempenha um papel importantíssimo no meio industrial. A manutenção preventiva tem como objetivo principal a detecção precoce de avarias de forma a prevenir a rutura total da instalação.

Nos últimos anos muitos sistemas têm vindo a ser desenvolvidos e embora baseados nos mais diversos métodos, os resultados obtidos têm sido bastante interessantes. Nesta dissertação é apresentado um sistema de detecção de avarias em tempo real baseado num referencial tridimensional de correntes.

O modelo apresentado é composto essencialmente por três fases: numa primeira fase é feita a aquisição das correntes de linha do motor, em segundo lugar os dados recolhidos são computados através de um método estatístico designado por PCA, a partir do qual se obtêm os vetores e os valores próprios. Numa fase final é feito o diagnóstico da condição do motor e é reportada a gravidade da avaria. Uma vez que as avarias elétricas representam cerca de 30% das avarias identificadas em motores de indução, este sistema foca-se essencialmente na detecção de avarias nos enrolamentos do estator e nas barras do rotor.

Devido á sua simplicidade e eficácia na detecção de avarias, espera-se que futuramente este modelo possa vir a ser integrado no meio industrial.

Palavras-chave: motor de indução, manutenção preventiva, diagnóstico de avarias, correntes do estator, PCA, padrão de corrente, vetor próprio, valor próprio.

ABSTRACT

In the modern industry, where the electrical machines take a very important role, the induction motor is the one that plays the most varied functions, and most of the times is chosen instead of the synchronous or the DC machine. Due to its importance it is necessary to ensure the safety and the continuity of its processes, and in that context, the predictive maintenance plays an extremely important role on the industry. The main goal of the predictive maintenance is to perform an early detection of the motor faults in order to prevent the total failure of the system.

In the last years, several systems based in many methods have been developed and reported, always presenting very interesting results. In this work, a real time fault diagnosis system based on a 3D current referential is proposed.

The presented model is essentially composed by three steps: Firstly, the line currents of the motor are acquired, secondly the collected data is computed by a statistics method called PCA, from which the eigen vectors and the eigen values are obtained. Finally, the diagnosis of the motor condition is made and the extend of the fault is reported. Because the electric failures represent 30% of the identified failures in induction motors, this system focuses mainly in the detection of stator and rotor faults.

Due to its simplicity and effectiveness detecting failures, it's expected that someday this model can be integrated in the industry.

Keywords: induction motor, predictive maintenance, failure diagnosis, stator currents, PCA, current pattern, eigen vector, eigen value.

ÍNDICE

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xix
Acrónimos	xxi
1 Introdução	1
1.1 Contexto	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura	2
2 Estado de Arte	5
2.1 Motor de Indução Trifásico	5
2.1.1 Arquitetura	5
2.1.2 Princípio de Funcionamento	6
2.2 Falhas em Motores de Indução Trifásicos	7
2.2.1 Falhas no Estator	8
2.2.2 Falhas no Rotor	9
2.2.3 Falhas nos Rolamentos	11
2.2.4 Falhas no Eixo	12
2.2.5 Excentricidades	14
2.3 Relés de Proteção	16
2.3.1 História dos Relés de Proteção	16
2.3.2 Relés de Proteção para Motores de Indução Trifásicos	17
2.3.3 Panorama do Mercado	17
2.4 Sistema de Diagnóstico Proposto	23
3 Sistema de Detecção e Diagnóstico Desenvolvido	25
3.1 Sistema de Coordenadas 3D	25
3.2 Fluxogramas de Operação	31
4 TPU M220	33
4.1 Especificações da TPU M220	33
4.2 Implementação do SDDF	34

5	Resultados Experimentais	39
5.1	Montagem experimental	39
5.2	Avarias provocadas	42
5.3	Alimentação a partir da rede (com auto-transformador)	44
5.3.1	Motor saudável	44
5.3.2	Avaria no estator	46
5.3.3	Avaria no rotor	51
5.3.4	Excentricidades	55
5.4	Alimentação com inversor PWM V/f	58
5.4.1	Motor saudável	58
5.4.2	Avaria no estator	59
5.4.3	Avaria no rotor	61
5.5	Comparação de resultados	63
6	Conclusões e trabalho futuro	65
6.1	Conclusão	65
6.2	Sugestões de trabalho futuro	67
	Referências	69
A	Anexo	73

LISTA DE FIGURAS

2.1	Vista explodida de um MIT (adaptado de [4]).	5
2.2	Correntes rotóricas.	7
2.3	Estudos levados a cabo pelo EPRI e pelo IEEE - IAS (adaptado de [4]).	7
2.4	Média dos dois estudos.	8
2.5	Tipos de rotor de um MIT.	10
2.6	Tipos de rotor em gaiola de Esquilo [4].	10
2.7	Ilustração da fratura de barras e de anéis de um rotor, respetivamente [20]. . .	11
2.8	Geometria de um rolamento de esferas [20].	11
2.9	Tipos de desalinhamento nos rolamentos: (A) desalinhamento do veio, (B) deflexão do veio, (C) anel exterior torcido e (D) anel interior torcido [5]. . . .	12
2.10	Torção no eixo.	13
2.11	Situações de alinhamento/desalinhamento do eixo: (A) Desalinhamento paralelo, (B) Desalinhamento angular, (C) Correto alinhamento do eixo.	14
2.12	Ilustração de uma excentricidade [5].	14
2.13	Tipos de Excentricidade [20]: (A) motor sem excentricidade, (B) excentricidade estática, (C) excentricidade dinâmica, (D) excentricidade mista.	15
2.14	Gerações de Relés.	16
2.15	Relé digital SPIROTEC 7SK80 da Siemens.	18
2.16	Relé digital REM610 da ABB.	19
2.17	Relé digital MiCOM P220 da Schneider.	20
2.18	Relé digital Multilin M60 da General Electric.	21
2.19	Relé digital TPU M220 da EFACEC.	22
3.1	Estrutura do sistema desenvolvido(adaptado de [6])	26
3.2	Padrões descritos pelas correntes de alimentação do motor	27
3.3	Algoritmo de deteção e diagnóstico de avarias(adaptado de [6])	29
3.4	Descrição do processo de deteção de avaria no estator.	31
3.5	Descrição do processo de deteção de avaria no rotor.	31
3.6	Descrição do processo de deteção de avaria nas barras condutoras do rotor. .	32
4.1	Apresentação do painel frontal da TPU M220 (adaptado de [4].)	33
4.2	Mecanismo de janela deslizante utilizado na computação de dados (adaptado de [5]).	35

4.3	Acesso á TPU M220 em modo utilizador.	36
4.4	Acesso á TPU M220 em modo administrador.	37
5.1	Montagem experimental utilizada.	39
5.2	Motores de indução trifásicos da marca Guanglu.	40
5.3	Chapa de características dos motores (adaptado de [5]).	41
5.4	Unidade de medição e controlo de carga De Lorenzo.	41
5.5	Resistências utilizadas para provocar avaria numa das fases do estator.	42
5.6	Rotor perfurado para provocar avaria nas barras (adaptado de [5]).	43
5.7	Disco metálico e pesos utilizados para provocar a excentricidade no eixo.	43
5.8	Correntes de linha do motor saudável a 67% da potência nominal.	44
5.9	(a) Padrão descrito pelas correntes (b) vetores próprios do motor saudável a 67% da potência nominal.	45
5.10	(a) Valores próprios (b) espectro do quadrado da corrente do motor saudável a 67% da potência nominal.	45
5.11	Variação dos índices de severidade do (a) estator (b) rotor (c) barras quebradas do motor saudável, em função da potência.	46
5.12	Correntes de linha do motor com avaria no estator a 67% da potência nominal.	47
5.13	Padrão descrito pelas correntes e vetores próprios do motor com avaria no estator a 67% da potência nominal.	47
5.14	(a) Valores próprios (b) espectro do quadrado da corrente do motor com avaria no estator a 67% da potência nominal.	48
5.15	Padrão descrito pelas correntes do motor com avaria na (a) fase A (b) fase B (c) fase C.	49
5.16	Padrão descrito pelas correntes para diferentes níveis de avaria (a) nível A (b) nível B (c) nível C.	50
5.17	Valores próprios das correntes para os diferentes níveis de avaria(a) nível A (b) nível B (c) nível C.	50
5.18	Variação dos índices de severidade do (a) estator (b) rotor (c) barras quebradas do motor com avaria no estator, em função da potência.	51
5.19	Padrão descrito pelas correntes e vetores próprios do motor com avaria no rotor a 67% da potência nominal: (a) 2 BQ (b) 9 BQ.	52
5.20	Valores próprios do motor com avaria no rotor a 67% da potência nominal: (a) 2 BQ (b) 9 BQ.	52
5.21	Espectro da corrente do motor com avaria no rotor a 67% da potência nominal: (a) 2 BQ (b) 9 BQ.	53
5.22	Espectro do quadrado da corrente do motor com avaria no rotor a 67% da potência nominal: (a) 2 BQ (b) 9 BQ.	54
5.23	Variação dos índices de severidade do (a) estator (b) rotor (c) barras quebradas do motor com avaria no rotor, em função da potência.	54
5.24	Correntes de linha do motor com excentricidade a 67% da potência nominal.	55

5.25	(a) Padrão descrito pelas correntes (b) vetores próprios (c) valores próprios do motor com excentricidade a 67% da potência nominal.	56
5.26	Espetro de corrente: comparação entre o motor saudável e o motor com excentricidade.	57
5.27	Espetro do quadrado da corrente: comparação entre o motor saudável e o motor com excentricidade.	57
5.28	(a) Padrão descrito pelas correntes (b) valores próprios do motor saudável alimentado pelo inversor.	59
5.29	(a) Padrão descrito pelas correntes (b) valores próprios do motor com avaria no estator alimentado pelo inversor.	60
5.30	Padrão descrito pelas correntes do motor com avaria no rotor alimentado pelo inversor: (a) 2 BQ (b) 9 BQ.	61
5.31	Valores próprios do motor com avaria no rotor alimentado pelo inversor: (a) 2 BQ (b) 9 BQ.	61
5.32	Espetro do quadrado da corrente do motor com avaria no rotor alimentado pelo inversor: (a) 2 BQ (b) 9 BQ.	62

LISTA DE TABELAS

2.1	Tabela comparativa das diferentes gerações de relés de proteção [32].	17
2.2	Funções de proteção da unidade SPIROTEC 7SK80 [33].	18
2.3	Funções de proteção da unidade REM610 [34].	19
2.4	Funções de proteção das unidades MiCOM P220/P225 [35].	20
2.5	Funções de proteção da unidade M60 [36].	21
2.6	Funções de proteção da unidade TPU M220 [37].	22
5.1	Vetores próprios do motor com avaria no estator.	47
5.2	Valores do vetor próprio principal nos três casos de avaria.	48
5.3	Dados experimentais registados nos ensaios do motor com avaria no rotor. . .	53
5.4	Índices de severidade obtidos durante os três ensaios.	58
5.5	índices de severidade (IS) obtidos para o motor saudável em carga alimentado pelo inversor.	59
5.6	Vetores próprios do motor com avaria no estator alimentado pelo inversor. . .	60
5.7	IS obtidos para o motor com avaria no estator em carga alimentado pelo inversor.	60
5.8	IS obtidos para o motor com avaria no rotor em carga alimentado pelo inversor.	62
5.9	Comparação dos IS do estator obtidos para os dois casos em condições semelhantes.	63
5.10	Comparação dos IS do rotor obtidos para os dois casos em condições semelhantes.	63
5.11	Comparação dos IS de barras quebradas obtidos para os dois casos em condições semelhantes.	64

ACRÓNIMOS

ANSI American National Standards Institute.

CTs Transformadores de corrente.

EPRI Electric Power Research Institute.

f.e.m. força eletromotriz.

FFT Fast Fourier Transform.

IAS Industry Applications Society.

IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers.

IS índices de severidade.

MIT Motor de Indução Trifásico.

MITs Motores de Indução Trifásicos.

PCA Principal Component Analysis.

SDDF Sistema de Detecção e Diagnóstico de Falhas.

VTs Transformadores de tensão.

1

INTRODUÇÃO

De forma a introduzir a dissertação ao leitor, neste capítulo é feita uma contextualização do problema que levou à sua elaboração, os objetivos a que se propõe e ainda uma breve descrição dos restantes capítulos que a compõem.

1.1 Contexto

Os anos passam e as máquinas elétricas, em particular os Motores de Indução Trifásicos (MITs), vão desempenhando um papel cada vez mais importante não só no sector industrial mas também na economia dos países desenvolvidos.

Aliados à sua simplicidade e baixo custo de produção, a sua robustez e reduzida necessidade de manutenção fazem com que o Motor de Indução Trifásico (MIT) seja normalmente preferido em detrimento das máquinas síncronas e de corrente contínua. Estima-se que atualmente 40% a 50% da energia produzida por países industrializados seja consumida por este tipo de máquina [1].

Apesar da sua robustez, devido ao desgaste provocado pelas longas horas de utilização e tal como qualquer outro dispositivo eletromecânico, o MIT acabará por avariar. Avarias associadas, por exemplo, aos enrolamentos do estator podem levar a aumentos de corrente e interferir diretamente com o consumo elétrico ou diminuição do rendimento do motor. Em casos extremos poderá provocar graves danos na instalação elétrica. Dependendo da importância da máquina no sector, a sua avaria poderá levar a longas paragens do processo industrial e consequentemente a graves prejuízos financeiros [2]. De forma a prevenir ao máximo tais consequências é necessário que seja feita uma manutenção periódica do equipamento. Contudo esta tarefa nem sempre é fácil pois requer tempo e mão de obra especializada. Em alguns casos poderá ser necessária a substituição do motor até que se proceda à sua reparação, noutros poderá mesmo ter de se efetuar a substituição em definitivo do equipamento. Ambas as situações apresentam um elevado custo para o proprietário. De acordo com [3] os custos de manutenção no setor industrial ascendem a 80% do montante anual investido em maquinaria.

Pela necessidade de um sistema de supervisão em tempo real, de baixo custo e que exija o mínimo de mão de obra possível surge o tema central desta dissertação. Sistemas deste tipo permitem que se atue sobre o motor apenas sob suspeita de avaria levando assim a uma redução de custos e do tempo de paragem.

1.2 Objetivos

Inserida na área do diagnóstico e deteção de avarias em MITs esta dissertação tem como principal objetivo a conceção de um Sistema de Deteção e Diagnóstico de Falhas (SDDF) não evasivo e em tempo real. Desta forma dar-se-á continuidade aos trabalhos iniciados em [4] e [5].

Partindo de um modelo teórico apresentado em [6] e para que o objetivo principal possa ser atingido, foram propostas algumas metas a alcançar no decorrer dos trabalhos. Resumidamente:

1. Revisão teórica dos tipos de avaria presentes em MITs
2. Exploração do mercado associado aos relés de proteção digitais para motores de indução
3. Desenvolvimento de um sistema virtual de tratamento e análise de dados, recolhidos pelo do relé de proteção digital desenvolvido pela EFACEC (TPU M220), baseado num referencial de correntes 3D
4. Ensaaios laboratoriais em motores de baixa potência e análise dos dados recolhidos
5. Verificação dos resultados com alimentação a partir da rede e a partir de um inversor de tensão

Numa fase final, partindo das conclusões retiradas, será feita uma avaliação do sistema para que possa ser discutida a sua fiabilidade, viabilidade e até uma eventual integração no mercado.

1.3 Estrutura

A presente dissertação está dividida em seis capítulos entre os quais se inclui este capítulo introdutório.

- **Capítulo 2: Estado de Arte**

Neste capítulo é inicialmente feita uma descrição da arquitetura do MIT e também do seu princípio de funcionamento. Segue-se uma revisão teórica dos tipos de avarias elétricas e mecânicas às quais o motor está sujeito, um resumo da história dos

relés de proteção e por fim uma visão geral do panorama atual do mercado dos relés de proteção digitais. Este capítulo conclui com uma breve apresentação do sistema proposto.

- **Capítulo 3: Sistema de Detecção e Diagnóstico Desenvolvido**

Este capítulo apresenta detalhadamente o sistema desenvolvido, o método de computação de dados utilizado e também uma ilustração do sistema feita a partir de fluxogramas.

- **Capítulo 4: TPU M220**

No quarto capítulo é feita a apresentação da unidade de proteção digital TPU M220 desenvolvida pela EFACEC, a partir da qual foram recolhidas as amostras das correntes de linha dos motores. Neste capítulo é também descrito o método de implementação do sistema de acordo com as funcionalidades do dispositivo.

- **Capítulo 5: Resultados Experimentais**

Começando por descrever a montagem experimental utilizada e também as avarias provocadas nos motores, é neste capítulo que são apresentados e analisados todos os resultados obtidos a partir dos dados recolhidos durante ensaios laboratoriais.

- **Capítulo 6: Conclusões e trabalho futuro**

O sexto capítulo conclui esta dissertação fazendo uma avaliação do trabalho desenvolvido e apresentando também algumas sugestões para trabalho futuro.

- **Anexo A**

O Anexo A contém o código, desenvolvido em *Matlab*[®], utilizado na análise das amostras de corrente.

ESTADO DE ARTE

2.1 Motor de Indução Trifásico

Neste subcapítulo é apresentado o MIT, a sua arquitetura, o seu princípio de funcionamento, os fatores que levam ao aparecimento de avarias nos seus componentes principais, os tipos de avaria e a sua influência nas suas correntes de alimentação.

2.1.1 Arquitetura

O MIT é composto essencialmente por duas partes, uma parte fixa designada por estator e uma parte móvel, o rotor, que tem acoplado um sistema de ventilação que tem como função diminuir as perdas do motor e aumentar o seu rendimento. Estes dois componentes estão separados por um espaço aberto ao qual se dá o nome de entreferro. A figura 2.1 representa um MIT em gaiola de esquilo e permite observar alguns dos seus elementos.

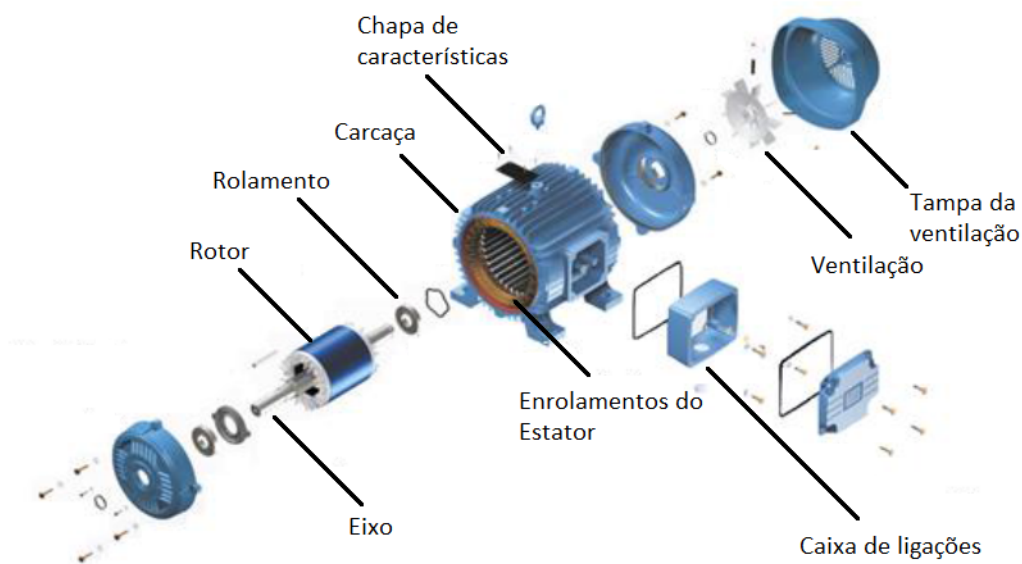


Figura 2.1: Vista explodida de um MIT (adaptado de [4]).

2.1.2 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento do MIT tem como base uma das principais leis do eletromagnetismo, a **lei geral da indução**.

A **lei geral da indução** diz que um condutor ao sentir um campo magnético variável no tempo, uma força eletromotriz (f.e.m.) é induzida nos seus terminais e caso o condutor esteja curto-circuitado, este vai permitir a circulação de corrente. Diz-se portanto que a corrente surge por indução [7] e daí vem o nome do motor. Esta lei é dada pela seguinte equação:

$$\epsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

Ao serem alimentados por um sistema trifásico de correntes, os três enrolamentos do estator, desfasados de 120° entre si, vão dar origem a um campo magnético girante com velocidade N (equação 2.2), dependente da frequência da rede de alimentação f e do número de pares de polos do motor p .

$$N = \frac{f}{p} \times 60 \quad [\text{rpm}] \quad (2.2)$$

O campo girante do estator criado no entreferro irá passar pelo rotor e consequentemente cada um dos seus condutores sentirá um campo variável no tempo. Pela lei geral da indução (equação 2.1) este fluxo variável irá induzir uma f.e.m. em cada um dos condutores, que por estarem curto-circuitados permitirão a circulação de correntes rotóricas. Uma vez que o campo girante do estator irá passar pelos condutores do rotor em instantes de tempo dependentes das suas posições, as correntes que circulam nos condutores serão correntes polifásicas e portanto, seguindo o raciocínio anterior, irão originar um campo girante no rotor com velocidade dependente da frequência das correntes [8].

Ao interagir com o campo do estator, o campo do rotor será arrastado e os dois estarão em sincronismo, porém, o rotor não gira á velocidade de sincronismo e diz-se portanto que está assíncrono com o campo do estator. Se estivesse síncrono, o rotor estaria "parado" relativamente ao campo girante do estator e não sentiria qualquer variação temporal de fluxo magnético, consequentemente não existiram correntes rotóricas [8].

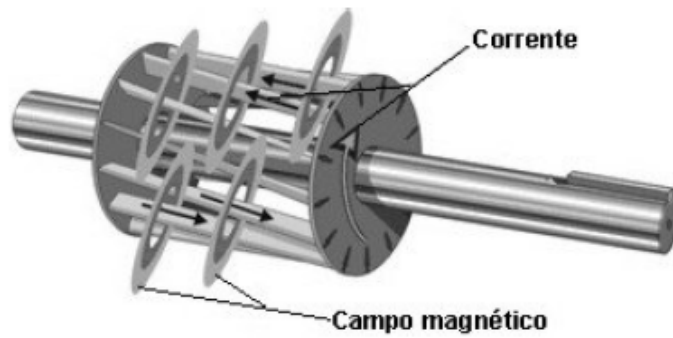
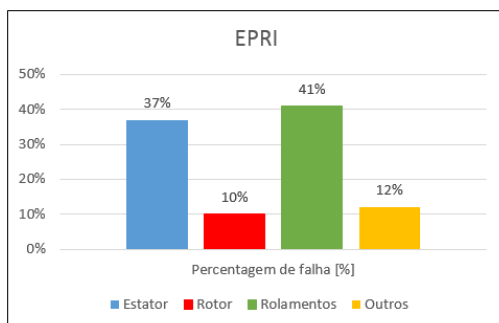


Figura 2.2: Correntes rotóricas.

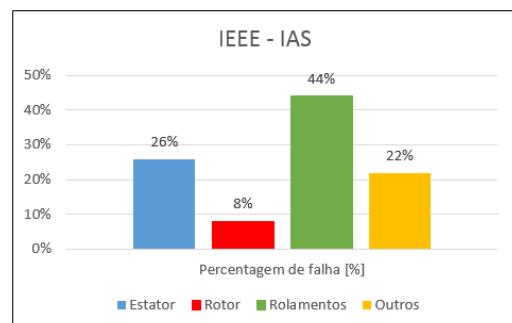
2.2 Falhas em Motores de Indução Trifásicos

De forma a identificar quais os componentes do motor que mais avarias sofrem, vários estudos têm sido realizados. Neste subcapítulo são apresentados dois estudos desenvolvidos por duas das mais prestigiadas instituições na ramo da engenharia [9] [10]:

- O Electric Power Research Institute (EPRI) [11] (figura 2.3 (a))
- O Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) - Industry Applications Society (IAS) [12] (figura 2.3 (b))



(a) Dados do EPRI.



(b) Dados do IEEE - IAS.

Figura 2.3: Estudos levados a cabo pelo EPRI e pelo IEEE - IAS (adaptado de [4]).

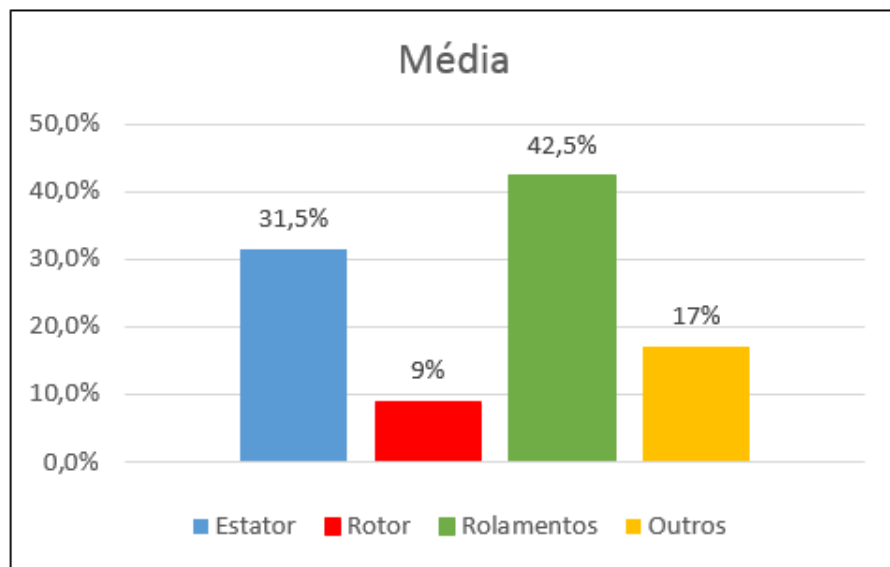


Figura 2.4: Média dos dois estudos.

Embora exista alguma oscilação nos valores recolhidos, os resultados são consensuais. Os rolamentos são efetivamente o componente mais afetado pelas avarias, seguindo-se o estator, componentes como o eixo ou excentricidades no entreferro e em último lugar o rotor.

2.2.1 Falhas no Estator

Relativamente às avarias nos enrolamentos do estator, estas podem ser de três tipos:

- Enrolamento com ligação á terra
- Curto-circuito entre fases
- Curto-circuito entre espiras

Todas estas avarias possuem um denominador comum, a deterioração do isolamento do MIT. As variações de temperatura são apontadas como sendo o principal responsável pela degradação do isolamento. De acordo com [13] para cada 10 graus Celcius acima da temperatura limite dos enrolamentos, a vida útil do isolamento reduz para 50%. No entanto, um motor em perfeito estado de funcionamento não deverá ter, por si só, um aumento de temperatura. Para este fenómeno são apontadas algumas causas:

- **Obstrução da ventilação do motor**, o calor gerado no estator e no rotor é dissipado por condução, convecção e radiação, uma obstrução do fluxo de ar que transporte esse calor produzido vai originar um aumento gradual da temperatura do motor. Por esta razão é recomendado que a limpeza do motor (exterior e interior) seja feita com alguma regularidade [14];

- **Excesso de carga**, por norma ao projetar um MIT, os fabricantes devem estabelecer uma determinada margem de segurança na carga nominal definida. Uma situação abusiva de excesso de carga no motor vai levar a um forte aumento da corrente de alimentação que por sua vez vai dar origem a um aumento brusco na temperatura do motor;
- **Desequilíbrios de tensão**, um desequilíbrio de 3,5% na tensão entre fases pode levar a um aumento de até 25% na fase com maior valor de corrente[14];
- **Variações de frequência** das tensões de alimentação. Segundo [15, 16], países como os Estados Unidos apresentam variações de frequência na ordem de 1% a 3% em 32% dos seus sistemas elétricos, variações estas que vão provocar um aumento da corrente nos enrolamentos e consequentemente um aumento da temperatura do motor;
- Dependendo do tipo de arranque escolhido para ligar o motor, a sua corrente de alimentação pode atingir um valor bastante superior ao valor da sua corrente nominal, **arranques sucessivos** num curto espaço de tempo podem, também, conduzir a um aumento da temperatura do motor.

Uma avaria nos enrolamentos do Estator resulta num aumento da corrente de curto-circuito e consequentemente no aparecimento de harmónicas na corrente de alimentação. Sendo p o número de pares de polos, s o escorregamento do MIT, n e k inteiros positivos e f a frequência da corrente de alimentação. A equação 2.3 [17] traduz matematicamente a frequência das harmónicas que surgem na corrente de alimentação do estator, resultantes deste tipo de avaria.

$$f_{CurtoCircuito} = \left\{ \frac{n}{p} (1 - s) \pm k \right\} f \quad [\text{Hz}] \quad (2.3)$$

2.2.2 Falhas no Rotor

As falhas no Rotor representam cerca de 9% das avarias de um MIT [5]. Existem dois tipos de rotor, o rotor em gaiola de esquilo e o rotor bobinado (ver figura 2.5) sendo que actualmente os primeiros são os mais utilizados pelos fabricantes. O rotor em gaiola de esquilo pode ser fundido ou fabricado (ver figura 2.6), ao mesmo tempo que os rotores fundidos apresentam uma maior durabilidade face aos fabricados, apresentam também uma reparação quase impossível devido ao seu processo de fabrico [18], os dois são na sua maioria produzidos em cobre ou alumínio.

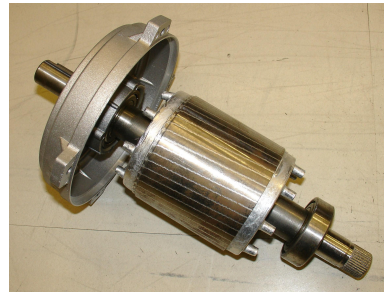
Em [3, 19] a culpa das falhas no rotor é atribuída ao seu deficiente processo de fabrico, mais precisamente:

- Problemas na soldagem das barras e dos anéis
- Folgas nas cavas que permitem o movimento das barras

- Fraca qualidade e defeitos na geometria dos anéis de suporte



(a) Rotor bobinado.



(b) Rotor em gaiola de esquilo.

Figura 2.5: Tipos de rotor de um MIT.



(a) Rotor fundido.



(b) Rotor fabricado.

Figura 2.6: Tipos de rotor em gaiola de Esquilo [4].

De acordo com [5] 51% das avarias do rotor dão-se na gaiola de esquilo e manifestam-se através de pequenas fissuras nas barras do rotor que evoluem para roturas totais das mesmas. Além das razões supra citadas, este fenómeno pode agravar-se por ação de fatores de cariz magnético, dinâmico, térmico ou até mesmo devido a fatores ambientais.

A quebra total de uma barra vai, por sua vez, originar um aumento da corrente nas restantes barras e assim influenciar quer o binário quer a temperatura do motor. Consequentemente pode levar também a uma quebra no rendimento da máquina, ao aparecimento de vibrações ou até mesmo de excentricidades.

Todo este fenómeno vai conduzir ao aparecimento de novas harmónicas no espectro das correntes do estator. Estas novas frequências designam-se por “bandas laterais” e são dadas pela equação 2.4 [9] sendo que f representa a frequência das correntes de alimentação do motor e s o escorregamento e $k = 1, 2, 3, \dots$ um número inteiro positivo.

$$f_{\text{BarrasQuebradas}} = (1 \pm 2ks)f \quad [\text{Hz}] \quad (2.4)$$

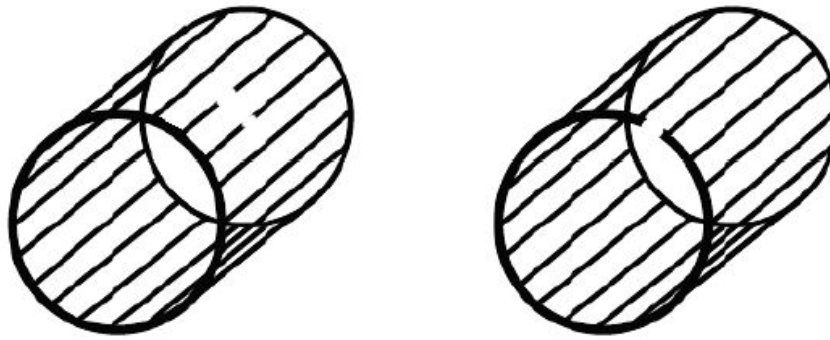


Figura 2.7: Ilustração da fratura de barras e de anéis de um rotor, respectivamente [20].

2.2.3 Falhas nos Rolamentos

Na lista dos componentes de maior importância de um MIT destacam-se os rolamentos, a sua função consiste em suportar o veio da máquina de forma a permitir a sua rotação. A rotação do veio é feita por ação de um sistema de esferas que constituem o rolamento. Este sistema é constituído por dois anéis (exterior e interior) que delimitam uma “gaiola”, devidamente lubrificada, onde estão as esferas [3]. Em vez de esferas, podemos também ter rolos cilíndricos, alterado assim ligeiramente a geometria do sistema (ver figura 2.8).

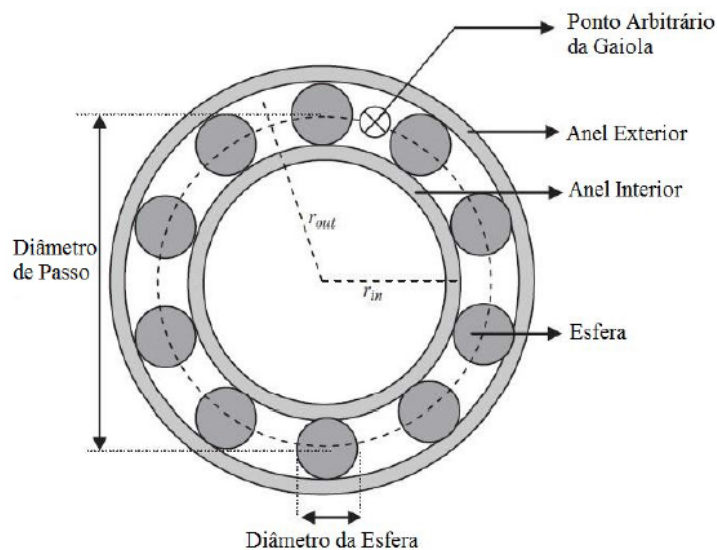


Figura 2.8: Geometria de um rolamento de esferas [20].

Comparativamente ao resto do motor, os rolamentos são um componente bastante pequeno, não obstante, representam 42,5% das avarias em MITs (figura 2.4), como tal exigem uma manutenção continua de forma a prevenir eventuais danos, sobretudo no que diz respeito á lubrificação das esferas. Problemas na lubrificação são o principal causador de problemas nos rolamentos, uma lubrificação deficiente vai aumentar o atrito das esferas, podendo também aumentar consideravelmente a temperatura do rolamento

e conseqüentemente acelerar a deterioração do lubrificante. Também substâncias “estranhas”, como água e ácidos, presentes nos locais onde operam os motores, podem levar a uma deterioração precoce do lubrificante. Desalinhamento dos rolamentos (ver figura 2.9) ou até mesmo excesso de carga são também acontecimentos que favorecem o desgaste prematuro das esferas [21].

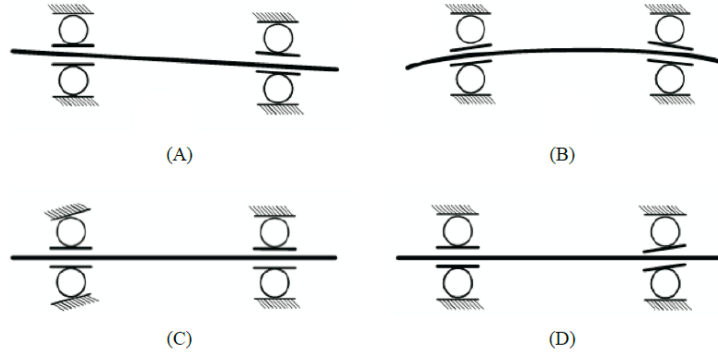


Figura 2.9: Tipos de desalinhamento nos rolamentos: (A) desalinhamento do veio, (B) deflexão do veio, (C) anel exterior torcido e (D) anel interior torcido [5].

À parte de todos os problemas a cima referidos, as avarias nos rolamentos podem também interferir diretamente com o bom funcionamento do motor causando vários distúrbios, entre eles problemas de binário devido ao aumento do binário resistente do rolamento, poluição sonora e vibrações causadas por eventuais impactos entre os elementos rolantes e as superfícies defeituosas [22].

Como qualquer avaria, a avaria dos rolamentos vai influenciar as correntes do estator através da indução de novas harmônicas no seu espectro. De acordo com [23], para rolamentos com seis a doze esferas, estas novas harmônicas que surgem no espectro das correntes estatóricas podem ser aproximadas de forma bastante satisfatória pela equação 2.5, onde n_1 e n_2 representam números inteiros positivos e f a frequência de alimentação.

$$f_{\text{Rolamento}} = (0.4n_1 + 0.6n_2) (1 - s) f \quad [\text{Hz}] \quad (2.5)$$

2.2.4 Falhas no Eixo

A transmissão do binário produzido por um motor á carga que lhe está acoplada é feita através do eixo de transmissão. Como qualquer componente, o eixo está sujeito a avarias. As avarias no eixo são originadas na sua grande maioria por problemas mecânicos e têm como principal consequência o aparecimento de vibrações no motor. Em [24] são apresentadas as principais causas de avaria em eixos de transmissão, sendo elas:

- Corrosão
- Fadiga

- Excesso de carga
- Desalinhamento

A corrosão e a fadiga do eixo são fatores que, embora mais demorados, podem conduzir a um desgaste prematuro do material e consequentemente levar à sua quebra. Por outro lado, estando o eixo sujeito a grandes velocidades (aproximadamente 3000 rpm no caso de um MIT de dois polos), este deve ser concebido para suportar a carga desejada [20]. Excesso de carga pode dar origem a torções no eixo (figura 2.10).

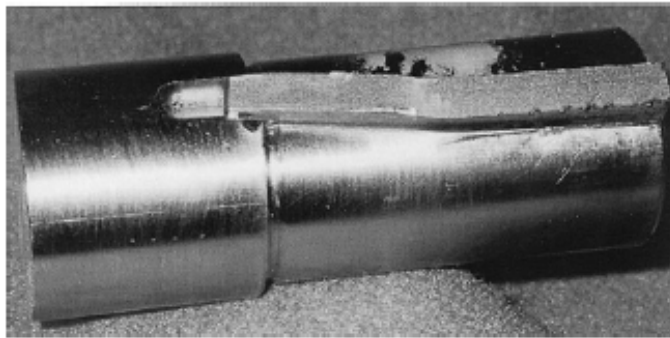


Figura 2.10: Torção no eixo.

Por reduzir drasticamente o tempo de vida das máquinas, o desalinhamento do eixo do motor é atualmente referido como sendo uma das principais causas de prejuízo na indústria [25].

Um correto alinhamento do eixo, além de reduzir as forças axiais e radiais, aumenta a durabilidade do motor enquanto mantém a estabilidade do rotor durante o seu estado de operação [26]. O desalinhamento entre eixos é um fenómeno bastante comum durante o processo de transmissão. Existem dois tipos de desalinhamento [25]: desalinhamento paralelo e desalinhamento angular (ver figura 2.11). Alguns autores referem ainda um terceiro tipo de desalinhamento, o desalinhamento combinado, que consiste basicamente na ocorrência simultânea do desalinhamento paralelo e angular.

Os desalinhamentos do eixo, em particular o desalinhamento angular, vão originar vibrações a diferentes frequências que afetam diretamente as correntes do estator, dando assim origem a novas harmónicas no seu espectro [25].

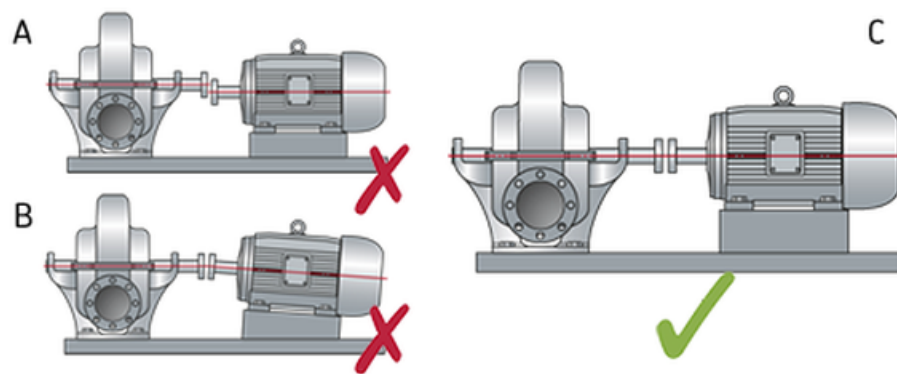


Figura 2.11: Situações de alinhamento/desalinhamento do eixo: (A) Desalinhamento paralelo, (B) Desalinhamento angular, (C) Correto alinhamento do eixo.

2.2.5 Excentricidades

No panorama atual da Indústria de fabrico de MITs, de forma a reduzir a relutância magnética total dos motores, aumentar o seu coeficiente de indução, o seu fluxo magnético e consequentemente aumentar o seu rendimento, os entreferros são projetados para ser cada vez mais pequenos. Por esta razão é também cada vez mais importante garantir o perfeito alinhamento entre estator e rotor, contudo a perfeição é atualmente impossível de atingir e como tal tolera-se um desalinhamento máximo na ordem dos 5%-10% [27, 28], este desalinhamento dá origem a “entreferros assimétricos existentes entre o estator e o rotor” [19], vulgarmente designados por excentricidades.

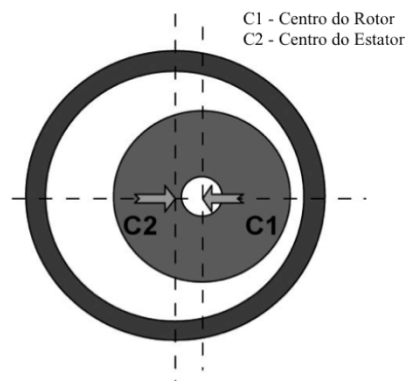


Figura 2.12: Ilustração de uma excentricidade [5].

A figura 2.12 ilustra uma excentricidade num MIT. Considerando o ponto C1 o centro do rotor e o ponto C2 o centro do estator, imediatamente se percebe que os dois estão desalinhados, existe então uma excentricidade no motor. Num motor dito “saudável” os dois pontos deveriam estar o mais alinhados possível.

Por alterarem a espessura do entreferro, o grande perigo das excentricidades deve-se ao desequilíbrio provocado na distribuição do fluxo magnético no entreferro e ao facto

de darem origem a uma sobrecarga mecânica sobre o veio do motor, que em situações extremas poderá levar à colisão entre o estator e o rotor e consequentemente à destruição do motor [29].

Existem dois tipos de excentricidade (figura 5.24):

- **Excentricidade estática** (figura 5.24 (B)) – Neste caso, o centro do estator e o centro do rotor estão desalinhados ($C1 \neq C2$) mas o rotor continua a girar em torno do seu eixo, ou seja, a alteração na espessura do entreferro permanece igual;
- **Excentricidade dinâmica** (figura 5.24 (C)) – Nesta situação, devido a um desequilíbrio na carga ou a uma torção no eixo, o centro do rotor vai girar em torno do centro geométrico do estator e assim provocar uma variação física e temporal da espessura do entreferro.

Na grande maioria dos casos, as duas situações acontecem em simultâneo (figura 5.24 (D)) é a chamada excentricidade mista [30].

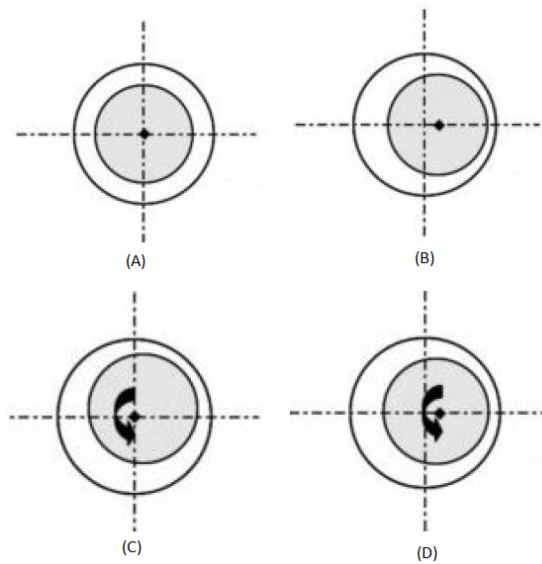


Figura 2.13: Tipos de Excentricidade [20]: (A) motor sem excentricidade, (B) excentricidade estática, (C) excentricidade dinâmica, (D) excentricidade mista.

As alterações na espessura do entreferro e as consequentes alterações no fluxo magnético irão contribuir para o aparecimento de novas harmónicas nas correntes do estator. A frequência destas harmónicas pode ser aproximada pela equação 2.6 [9] onde f representa a frequência de alimentação do motor, R é o número de barras do rotor, n_d a ordem da excentricidade, n_{ws} a categoria da excentricidade, s o escorregamento e p o número de pares de polos do motor.

$$f_{\text{Excentricidade}} = \left\{ (R \pm n_d) \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n_{ws} \right\} f \quad [\text{Hz}] \quad (2.6)$$

2.3 Relés de Proteção

2.3.1 História dos Relés de Proteção

Todo o sistema elétrico é passível de avarias e por isso atualmente em qualquer instalação é obrigatória a presença um sistema de proteção. A principal função de uma proteção é isolar o problema para que as partes saudáveis do sistema continuem a operar sem qualquer tipo de limitação.

No esquema de um sistema de proteção, a tarefa da tomada de decisão está a cargo do relé de proteção. A primeira aparição deste dispositivo data de 1905 [31] e prevalece até aos dias de hoje, tendo vindo a ganhar cada vez mais força. Com o passar dos anos a tecnologia dos relés de proteção tem vindo a sofrer importantes melhorias. O seu processo evolutivo divide-se em três diferentes gerações: a geração dos relés eletromecânicos, que vieram ao mundo há mais de 100 anos, a geração dos relés estáticos que surgiram por volta dos anos 60 e por ultimo a geração dos relés digitais, ou relés numéricos, que começaram a ser utilizados no início dos anos 80 [31] e que representam atualmente a tecnologia mais utilizada.



(a) Relé Eletromecânico.



(b) Relé Estático.



(c) Relé Digital.

Figura 2.14: Gerações de Relés.

Tabela 2.1: Tabela comparativa das diferentes gerações de relés de proteção [32].

Características do Relé	Eletromecânico	Estático	Digital
Precisão e sensibilidade	Bom	Muito bom	Excelente
Ciclo de vida	Longo	Curto	Curto
Operabilidade indesejada	Improvável	Possível	Possível
Fiabilidade	Alta	Boa	Moderada
Capacidade de discriminação	Baixa	Boa	Excelente
Monitorização de condição	Não	Não	Sim
Multifuncionalidade	Não	Limitada	Sim
Comunicação de dados	Não	Não	Sim
Controlo remoto	Não	Não	Sim
Imunidade a interferências	Alta	Baixa	Muito Baixa
Parametrização	Difícil	Fácil	Muito Fácil
Gama de configuração	Limitada	Ampla	Muito Ampla
Autodiagnóstico	Não	Não	Sim
Medição	Não	Não	Sim
Memória de eventos	Não	Não	Sim
Tamanho	Volumoso	Pequeno	Compacto
Display	Marcações	LEDs	LCD

2.3.2 Relés de Proteção para Motores de Indução Trifásicos

Com o desenvolvimento tecnológico e com o aumento do investimento feito nos MITs surgiu a necessidade de melhorar a sua manutenção. Uma avaria identificada atempadamente pode evitar um prejuízo de vários milhares de euros.

Atualmente, os relés digitais impõe-se como sendo a tecnologia dominante no mercado de proteções para motores elétricos, características como a multi-funcionalidade, precisão, capacidade de auto-diagnóstico, transmissão de dados e o excelente interface Homem-máquina, entre outras, tornam estes dispositivos uma excelente opção para a proteção de motores de indução.

2.3.3 Panorama do Mercado

Nos últimos anos, várias são as marcas que têm vindo a investir no desenvolvimento de novos relés de proteção para MITs. No panorama atual do mercado o leque de opções oferecido aos clientes é cada vez mais vasto e pode variar entre o modelo standard e o topo de gama.

De seguida é apresentado um conjunto de dispositivos de proteção, fabricados por algumas das principais marcas existentes no mercado. Dependendo do modelo, cada uma destas unidades é programada com diferentes funções de proteção. Cada uma dessas funções é homologada pelo American National Standards Institute (ANSI), sendo-lhe, consequentemente, atribuído um código de identificação.

Fabricado e comercializado pela Siemens, o relé digital SPIROTEC 7SK80 foi concebido para a proteção e supervisão de motores de indução.

Tabela 2.2: Funções de proteção da unidade SPIROTEC 7SK80 [33].

ANSI	Funções de proteção
37	Proteção de mínima intensidade de corrente
46	Proteção de máximo de desequilíbrio
46	Proteção de máximo de componente inversa
49	Proteção de imagem térmica
50/51	Proteção de máxima intensidade de corrente
50BF	Proteção de falha do disjuntor
50N/51N	Proteção de máxima intensidade de corrente homopolar
51LR	Proteção de rotor bloqueado
67Ns	Proteção direcional de Terra



Figura 2.15: Relé digital SPIROTEC 7SK80 da Siemens.

Fabricada pela ABB, a unidade REM610 foi concebida para a proteção e supervisão de máquinas assíncronas de alta e baixa tensão.

Tabela 2.3: Funções de proteção da unidade REM610 [34].

ANSI	Funções de proteção
37	Proteção de mínima intensidade de corrente
46	Proteção de máximo de componente inversa
49	Proteção de imagem térmica
50/51	Proteção de máxima intensidade de corrente
50BF	Proteção de falha do disjuntor
50N/51N	Proteção de máxima intensidade de corrente homopolar



Figura 2.16: Relé digital REM610 da ABB.

A empresa Francesa Schneider Electric disponibiliza no mercado a sua gama P22x, de relés de proteção de motores, da qual fazem parte as unidades MiCOM P220/P225.

Tabela 2.4: Funções de proteção das unidades MiCOM P220/P225 [35].

ANSI	Funções de proteção
27	Proteção de mínima tensão
37	Proteção de mínima intensidade de corrente
46	Proteção de máximo de componente inversa
49	Proteção de imagem térmica
50/51	Proteção de máxima intensidade de corrente
50BF	Proteção de falha do disjuntor
50N/51N	Proteção de máxima intensidade de corrente homopolar
51LR	Proteção de rotor bloqueado



Figura 2.17: Relé digital MiCOM P220 da Schneider.

Pertencente á gama de relés digitais Multilin, a proteção M60 é fabricada pela companhia Americana General Electric.

Tabela 2.5: Funções de proteção da unidade M60 [36].

ANSI	Funções de proteção
27	Proteção de mínima tensão
32	Proteção contra retorno de potência ativa
37	Proteção de mínima intensidade de corrente
46	Proteção de máximo de componente inversa
49	Proteção de imagem térmica
50/51	Proteção de máxima intensidade de corrente
50BF	Proteção de falha do disjuntor
50N/51N	Proteção de máxima intensidade de corrente homopolar
59	Proteção de máxima tensão
59N	Proteção de máxima tensão homopolar
67	Proteção direcional de corrente
67N	Proteção direcional de Terra
81O	Proteção de máxima frequência
81U	Proteção de mínima frequência
87S	Proteção diferencial do estator



Figura 2.18: Relé digital Multilin M60 da General Electric.

Utilizada na implementação do sistema desenvolvido nesta dissertação, a unidade digital de proteção TPU M220, pertence à família de relés digitais x220 fabricada pela EFACEC.

Tabela 2.6: Funções de proteção da unidade TPU M220 [37].

ANSI	Funções de proteção
27	Proteção de mínima tensão
37	Proteção de mínima intensidade de corrente
46	Proteção de máximo de componente inversa
49	Proteção de imagem térmica
50/51	Proteção de máxima intensidade de corrente
50N/51N	Proteção de máxima intensidade de corrente homopolar
51LR	Proteção de rotor bloqueado
59	Proteção de máxima tensão
59N	Proteção de máxima tensão homopolar
81O	Proteção de máxima frequência
81U	Proteção de mínima frequência



Figura 2.19: Relé digital TPU M220 da EFACEC.

2.4 Sistema de Diagnóstico Proposto

A análise do conteúdo apresentado no subcapítulo 2.2 sugere que uma exposição prolongada do MIT aos efeitos deteriorantes provocados pelas avarias poderá ter consequências irreversíveis na sua integridade física. Por exemplo, a exposição de um motor a elevados níveis de vibração, durante longos períodos de tempo, poderá conduzir à sua destruição, o que com toda a certeza dará origem a um elevado prejuízo para o proprietário. Neste contexto, de forma a evitar situações como esta, a manutenção preventiva desempenha um papel crucial na vida do motor e por isso, o processo de deteção e diagnóstico de avarias durante o seu período de funcionamento é determinante. Um diagnóstico atempado poderá significar uma poupança bastante significativa.

No sentido de melhorar e modernizar o processo, esta dissertação apresenta um SDDF desenvolvido com o objetivo de garantir uma análise precisa, em tempo real e sem a necessidade de recorrer à mão de obra humana. Este sistema, por ter sido implementado num relé industrial e não num simples computador, tem a particularidade de poder transitar para a indústria através de um produto comercial. A implementação do SDDF num relé de proteção digital possui também a vantagem de oferecer proteção elétrica ao sistema, permitindo uma atuação imediata sobre o problema.



SISTEMA DE DETEÇÃO E DIAGNÓSTICO DESENVOLVIDO

Neste capítulo são apresentados de forma detalhada o SDDF proposto e o algoritmo de computação de dados utilizado. Adicionalmente, o processo de diagnóstico das diferentes avarias é ilustrado recorrendo a fluxogramas.

3.1 Sistema de Coordenadas 3D

O sistema desenvolvido nesta dissertação baseia-se num modelo originalmente proposto por V. Fernão Pires, J.F. Martins e A.J. Pires em [6]. Este sistema utiliza um referencial de correntes tridimensional e consiste na análise dos vetores e dos valores próprios obtidos a partir da sua computação. O objetivo desta abordagem é, a partir de cálculos rápidos e pouco complexos, efetuar o diagnóstico da condição motor de forma não evasiva e em tempo real. De modo a detetar as avarias e a reportar a sua gravidade são calculados os índices de severidade que se obtêm a partir de relações algébricas entre os valores próprios das correntes. Este sistema foi essencialmente desenvolvido para a deteção de avarias no estator e no rotor, caso se detete uma avaria no estator o sistema tem a capacidade de identificar a fase defeituosa.

O SDDF desenvolvido compreende três fases distintas (figura 3.1):

- Aquisição das correntes trifásicas do motor
- Computação das amostras das correntes trifásicas de linha do motor. Deste processo de computação resultam os vetores e os valores próprios, ν e λ respetivamente, que são os elementos chave na deteção e diagnóstico de avarias.
- Deteção e diagnóstico das avarias a partir da análise dos vetores próprios, dos valores próprios e também dos IS calculados.

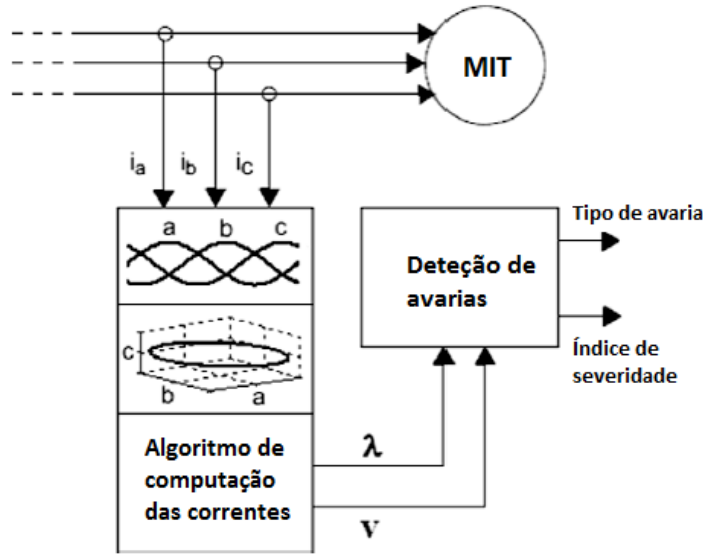


Figura 3.1: Estrutura do sistema desenvolvido(adaptado de [6])

De forma semelhante ao método do vetor de Park [38], este sistema baseia-se também na identificação dos padrões descritos pelas correntes do estator para a identificação das avarias.

Num MIT sem fio neutro, saudável, a funcionar nas condições ideais e alimentado por um sistema trifásico de tensões equilibrado, as suas correntes de alimentação deverão também ser estar equilibradas.

$$\begin{cases} i_A = I \sin(\omega t - \phi) \\ i_B = I \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \phi) \\ i_C = I \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \phi) \end{cases} \quad (3.1)$$

Nesta situação, o padrão descrito pelas três correntes será uma circunferência centrada no plano xyz, de raio R dado por:

$$i_A^2 + i_B^2 + i_C^2 = R^2 \quad (3.2)$$

Por outro lado, caso o motor esteja a operar sobre condições anormais, o padrão descrito pelas correntes vai alterar-se. No caso de uma avaria no estator o padrão das correntes vai descrever uma forma elíptica com uma orientação dependente da fase defeituosa. Se a falha for no rotor, o padrão irá adquirir uma forma semelhante a um "donut"(ver figura 3.2).

A interpretação destes padrões pode ser feita através da análise dos vetores e dos valores próprios das correntes adquiridas. Estes elementos permitem também identificar as relações entre correntes e as suas direções.

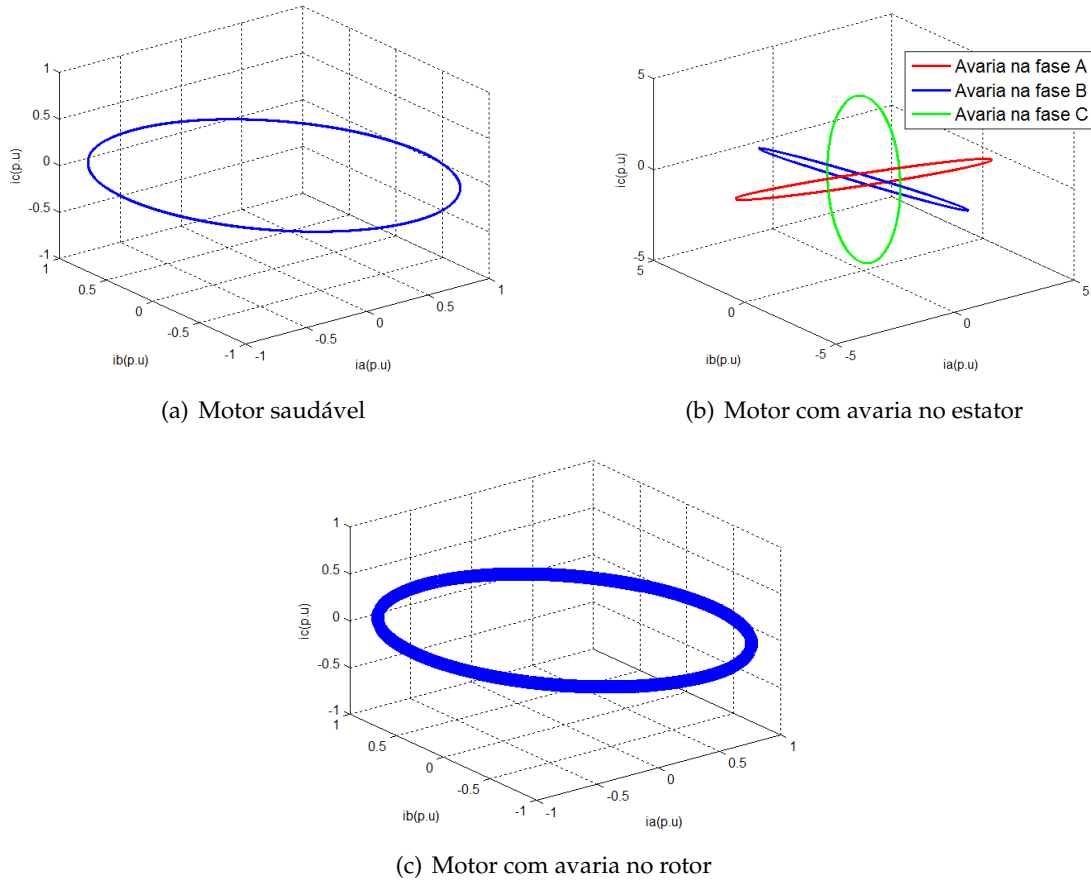


Figura 3.2: Padrões descritos pelas correntes de alimentação do motor

De forma a aumentar a capacidade de deteção e diagnóstico de avarias e também de proceder á análise de dados, este sistema utiliza um método estatístico designado por Principal Component Analysis (PCA). Formulado por Pearson em 1901, o PCA foi amplamente utilizado em teoria da comunicação, hoje em dia está fortemente implementado em áreas que vão desde a economia até á engenharia [6].

O PCA permite transformar uma série de valores correlacionados noutra de valores não correlacionados. Estes novos valores podem ser representados como combinações lineares dos valores antigos num novo espaço definido por vetores próprios, onde o componente principal é aquele que alberga maior energia relativamente aos dados recolhidos.

Para efetuar a computação das correntes utilizando o método PCA, em primeiro lugar define-se a matriz de amostras S (equação 3.3) de dimensão $n \times m$, onde n representa o número de amostras recolhidas e m o número de variáveis, neste caso $m = 3$ pois trata-se da análise de um sistema de correntes trifásicas .

$$S = \begin{bmatrix} i_A(t_0) & i_B(t_0) & i_C(t_0) \\ i_A(t_0 + \Delta t) & i_B(t_0 + \Delta t) & i_C(t_0 + \Delta t) \\ \dots & \dots & \dots \\ i_A(t_0 + (n-1)\Delta t) & i_B(t_0 + (n-1)\Delta t) & i_C(t_0 + (n-1)\Delta t) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Ao multiplicar a matriz de amostras S ($n \times 3$) pela sua transposta S^T ($3 \times n$) obtém-se uma matriz (3×3) E designada matriz de correlação.

$$E = S^T \cdot S \quad (3.4)$$

Na matriz E estão contidos os vetores e os valores próprios. Por se tratar de uma matriz 3×3 , a matriz E vai ter três valores próprios (λ_1 , λ_2 e λ_3) e um triplete de vetores próprios (v_1 , v_2 e v_3) ortogonais entre si.

Os vetores próprios podem ser calculados através da relação:

$$Ev = v\lambda \quad (3.5)$$

Ao rescrever a equação 3.5 obtém-se a expressão:

$$(E - I\lambda)v = 0 \quad (3.6)$$

Desta expressão podem ser, facilmente, retirados os valores próprios. Os dois primeiros valores próprios (λ_1 e λ_2) são os de maior importância e estão associados aos vetores próprios principal e secundário, respetivamente. A evolução temporal destes dois valores permite determinar o padrão descrito pelas correntes e também identificar o tipo de avaria no motor através do cálculo dos IS das avarias.

Caso λ_1 e λ_2 tenham valores iguais e constantes no tempo, o padrão das correntes do estator descreve uma circunferência e conclui-se que o motor está saudável. Valores próprios iguais mas variáveis no tempo, ou seja, alteram-se a cada ciclo de computação, vão afetar o raio da circunferência fazendo com que o padrão descreva uma forma semelhante a um "donut" e denuncie uma avaria nas barras do rotor. Por outro lado, valores próprios diferentes descrevem um padrão elíptico com orientação dada pelas direções da componente principal que representam também a fase afetada [6] (ver figura 3.3).

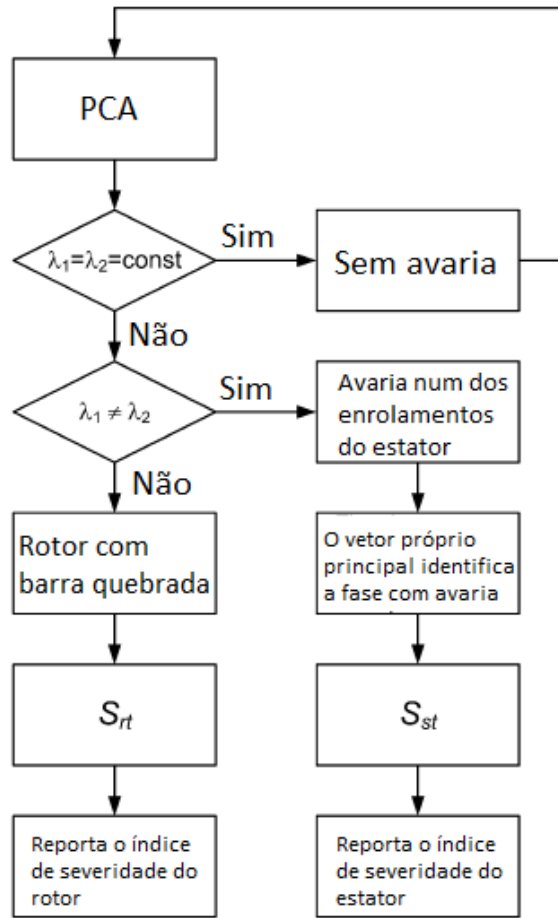


Figura 3.3: Algoritmo de detecção e diagnóstico de avarias(adaptado de [6])

Com a análise dos valores próprios, para além do diagnóstico da avaria é também possível determinar o sua gravidade. O grau de severidade da avaria é obtido a partir do cálculo dos IS.

No caso de avaria do estator o IS é calculado a partir da seguinte expressão:

$$IS_{Estator} = 1 - \frac{\lambda_{2medio}}{\lambda_{1medio}} \quad (3.7)$$

Para a avaria no rotor o IS é dado por:

$$IS_{Rotor} = \frac{\lambda_{1max} - \lambda_{1min}}{\lambda_{1max}} \quad (3.8)$$

No caso específico de avaria nas barras do rotor, tal como é referido no capítulo 2, surge o aparecimento de frequências estranhas no espetro das correntes do estator. Estas frequências, dadas pela equação 2.4, tendem a afastar-se da frequência fundamental de acordo com o escorregamento do motor e a sua identificação é normalmente feita a partir da análise da Fast Fourier Transform (FFT) da corrente. Ainda que seja possível recorrer ao uso de programas de computação de numérica, como por exemplo o *Matlab*®, para automatizar o processo de análise do espetro da corrente, o facto de se querer implementar o sistema num relé industrial, bem como uma série de outros fatores, tornam esta tarefa bastante complicada:

- Situações de avaria de baixa gravidade
- Necessidade de estimação da velocidade do motor na ausência de um equipamento de medição
- Possível mascaramento das frequências de avaria com a frequência da rede para casos de baixo escorregamento

Face a este problema, em [39] é proposto um novo método de análise de frequências que consiste na análise do espetro do quadrado da corrente e tem a grande vantagem de apenas necessitar da corrente de uma das fases do motor. Neste método a frequência fundamental da corrente sofre uma translação passando de f para $2.f$ [39]. Posto isto, a equação 2.4 deixa de ser válida e passa a ser dada por:

$$f_{BQ_{\text{quadrado}}} = (1 \pm k.s).2.f \quad (3.9)$$

e também por:

$$f_{BQ_{\text{quadrado}}} = 2.k.s.f \quad (3.10)$$

Por remeter novamente para frequências nas bandas laterais da frequência fundamental, a equação 3.9 é desprezada e a análise das frequências de avaria é feita apenas com base na equação 3.10.

Devido ao quadrado da corrente utilizado por este método, é introduzida no espetro uma componente continua situada em $f = 0$ Hz que serve de base ao diagnóstico da avaria. O cálculo do IS de barras quebradas, que deixa de ser feito com base nos valores próprios, passa a ser dado por:

$$IS_{\text{BarrasQuebradas}} = \frac{|I_A^2(2.s.f)|}{|I_A^2(0)|} \quad (3.11)$$

3.2 Fluxogramas de Operação

Os fluxogramas seguidamente apresentados ilustram os processos de deteção das diferentes avarias.

• Avaria no estator

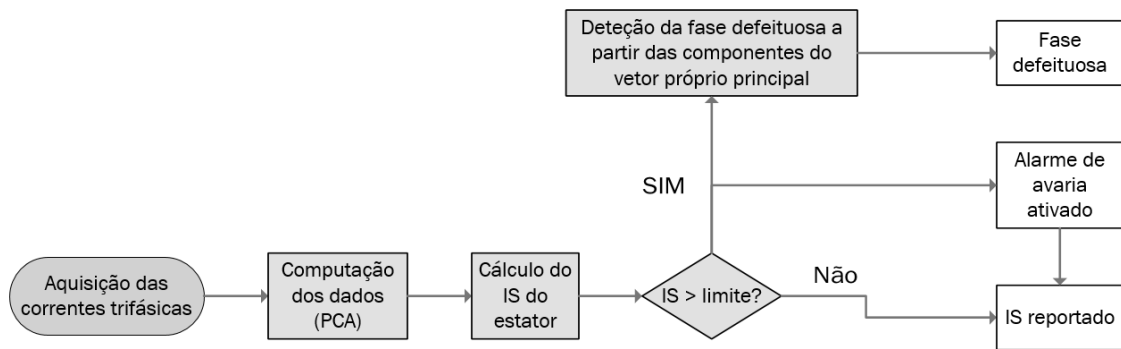


Figura 3.4: Descrição do processo de deteção de avaria no estator.

A figura 3.4 ilustra o processo de deteção de avaria no estator. Em primeiro lugar é feita a aquisição das correntes de linha do motor e em seguida são computadas utilizando o método PCA, a partir do qual se obtêm os valores próprios e através dos quais é calculado o IS do estator. Uma vez obtido esse valor, o mesmo é comparado com o valor limite definido para a avaria no estator. Caso o IS obtido seja menor ou igual ao limite nada acontece e o valor é apenas reportado pelo sistema ao utilizador. Caso o valor seja superior ao limite estabelecido, é ativado um alarme de avaria e a fase defeituosa é identificada a partir da análise do módulo das componentes do vetor próprio principal. Juntamente com o IS, as duas informações são transmitidas ao utilizador.

• Avaria no rotor

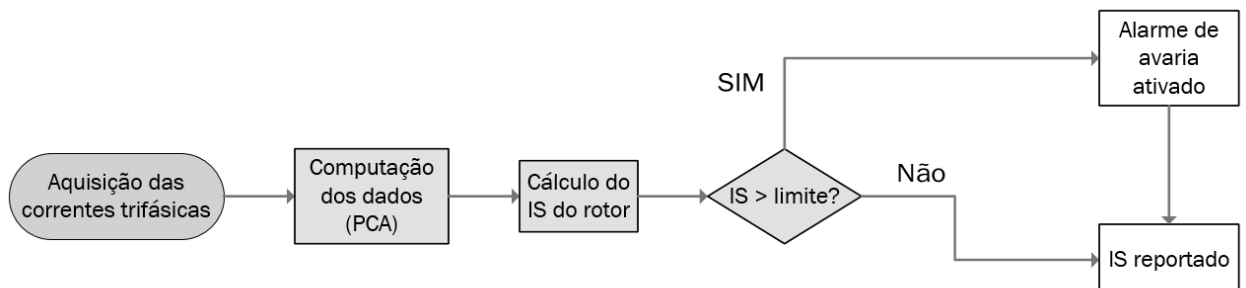


Figura 3.5: Descrição do processo de deteção de avaria no rotor.

A figura 3.5 descreve o processo de detecção de avaria no rotor. Este processo é em tudo semelhante ao do estator, contudo, neste tipo de avaria não existem fases a ser identificadas e como tal apenas o alarme é ativado e o IS do rotor reportado ao utilizador.

- **Avaria nas barras do rotor**

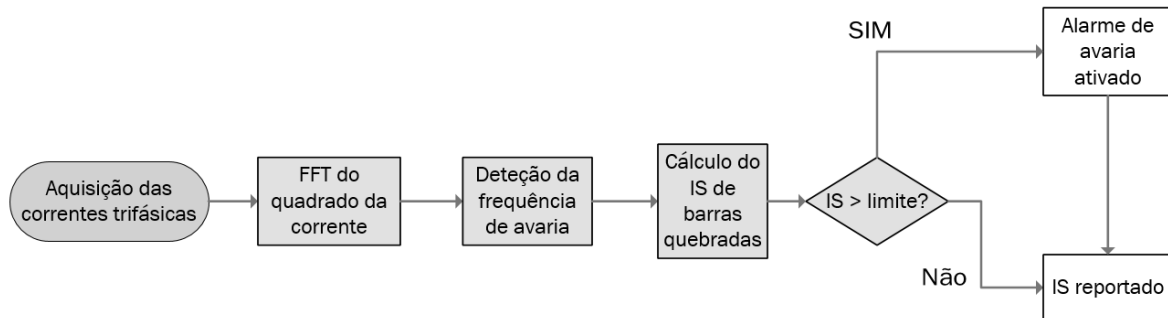


Figura 3.6: Descrição do processo de detecção de avaria nas barras condutoras do rotor.

No processo de detecção de avaria nas barras do rotor apresentado na figura 3.6, o IS de barras quebradas é calculado a partir da frequência de avaria detetada pelo sistema na análise da FFT do quadrado da corrente recolhida. Tal como no processo de diagnóstico de avaria no rotor, caso o valor calculado seja superior ao limite estabelecido, o alarme de avaria é ativado e o IS de barras quebradas é disponibilizado ao utilizador.

4

TPU M220

Neste capítulo são apresentadas as especificações do relé de proteção digital TPU M220 e também o método de implementação do SDDF na unidade.

4.1 Especificações da TPU M220

Apresentada anteriormente no capítulo 2, a unidade de proteção TPU M220 pertence à gama de relés digitais x220 produzida pela EFACEC. Podendo ser utilizadas nas mais diversas funções, este modelo destina-se particularmente à proteção de motores e geradores de média e alta tensão.

Além das funções de proteção apresentadas no capítulo 2, esta unidade possui ainda uma série de funcionalidades destinadas a funções de proteção programáveis.

Tal como está ilustrado na figura 4.1, a TPU M220 vem equipada com um LCD 20x4 alfanumérico associado a um teclado de navegação que permite o acesso ao estado do relé. Possui também quatro botões para funções programáveis que indicam o estado de funcionamento da unidade e ainda oito LEDs programáveis destinados a alarmes.

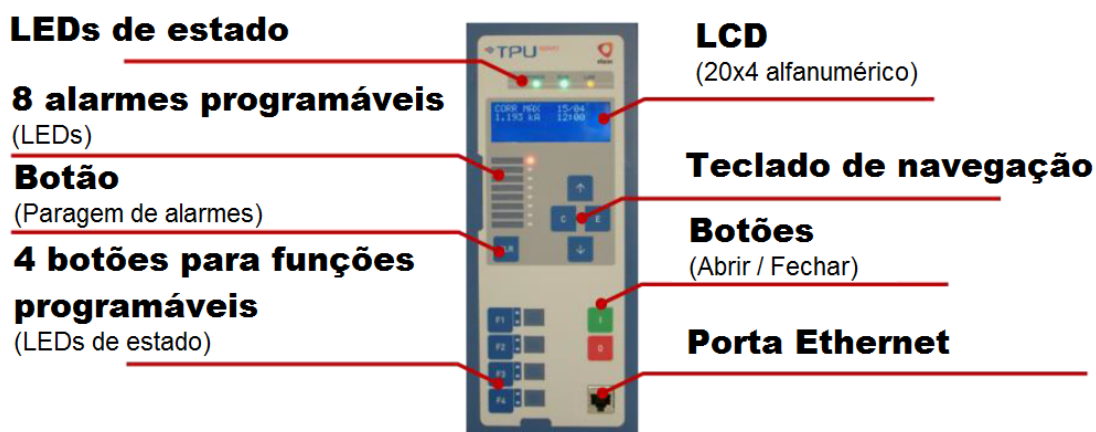


Figura 4.1: Apresentação do painel frontal da TPU M220 (adaptado de [4].)

A TPU M220 possui também dois conjuntos de entradas analógicas associadas a transformadores de medição que permitem a aquisição de correntes e de tensões. Os Transformadores de tensão (VTs) operam numa escala de 100 V, 110 V, 115 V ou 120 V dependendo da sua aplicação, enquanto os Transformadores de corrente (CTs) utilizam uma escala de 1 A ou 5 A. Ambas as escalas podem ser alteradas através de um interruptor instalado no interior da unidade.

A unidade de processamento do dispositivo é composta por um processador de 32 bits, o OMAP-L138, produzido pela Texas Instruments. Este processador é formado por dois núcleos primários que desempenham funções paralelas:

- TMS320C678 (DSP) utilizado para funções de processamento de sinal
- ARM926EJ-S utilizado para funções genéricas

4.2 Implementação do SDDF

Para maximizar o desempenho do SDDF retirando o máximo partido das funcionalidades da TPU M220 é utilizada uma das suas entradas analógicas para efetuar a aquisição das correntes de linha do motor. Durante processo de aquisição, as correntes são amostradas pela proteção a uma frequência de aproximadamente 1 kHz. Assumindo que a frequência de alimentação do motor é de 50 Hz significa que um período de corrente será definido por um intervalo de 20 amostras.

Tal como referido no capítulo anterior, o cálculo do IS de barras quebradas é feito a partir do módulo das frequências induzidas pela avaria nas correntes do estator. Uma vez que estas frequências são identificadas a partir do espectro do quadrado da corrente, é necessário recolher um número de amostras tal que a resolução da FFT apresente a melhor qualidade possível. Seja a resolução do espectro dada por:

$$Resolução_{FFT} = \frac{f_{amostragem}}{n^o_{amostras}} \quad (4.1)$$

Analisando a equação 4.1 rapidamente se conclui que a resolução da FFT é inversamente proporcional ao n^o de amostras recolhido. Estudos experimentais apresentados em [5] concluem que para uma frequência de amostragem de 1 kHz, 8200 é o número de amostras para o qual se obtêm os melhores resultados. Fazendo uso desta informação, a partir de uma biblioteca otimizada pela Texas Instruments (DSPLib), o sistema reproduz o espectro da corrente a partir de um vetor de 8200 amostras. Estas amostras são obtidas através de um processo de filtragem, independente do sistema, desempenhado por um conversor analógico-digital.

A figura 4.2 ilustra o mecanismo de janela deslizante utilizado na computação dos dados adquiridos pela TPU. Sendo que o padrão de correntes é definido por um período sinusoidal, este mecanismo permite ao sistema efetuar, a partir de intervalos de 20 amostras, o cálculo dos vetores e dos valores próprios das 8200 amostras de corrente recolhidas.

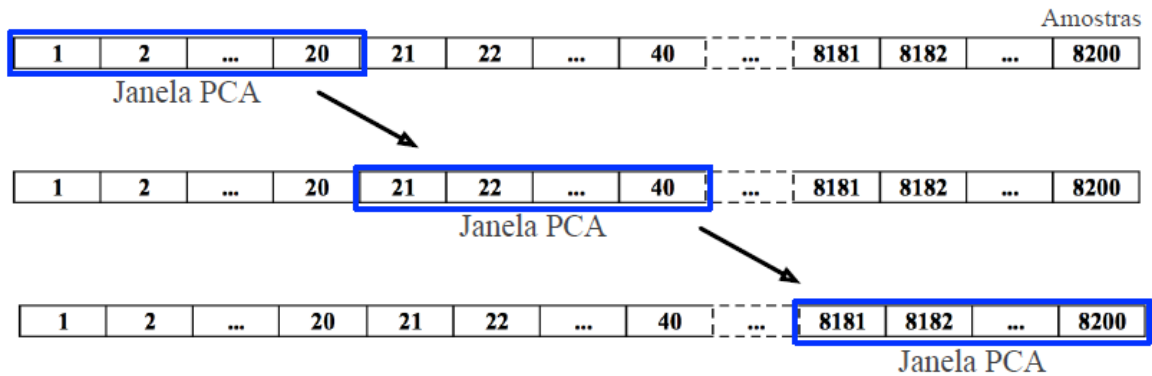


Figura 4.2: Mecanismo de janela deslizante utilizado na computação de dados (adaptado de [5]).

Para a verificação do regime estacionário considerou-se um método inicialmente implementado em [5] que por se ter demonstrado extremamente eficaz foi reutilizado na implementação deste sistema.

Neste método, obtidos os 410 valores próprios principais associados às correntes adquiridas, são definidos cinco intervalos de igual dimensão e calculada a média dos seus valores próprios. A partir das cinco médias resultantes é calculada a variância do conjunto, as amostras recolhidas apenas são validadas se a variância calculada for menor ou igual ao limite de variância previamente definido. Caso não sejam validadas o processo de amostragem repete-se até que a condição seja satisfeita.

Ainda com base no método apresentado, o cálculo dos IS do estator e do rotor é feito a partir dos valores próprios do intervalo de valores cuja a média esteja mais próxima do valor médio dos cinco intervalos.

Uma vez implementado o sistema é necessário aceder ao dispositivo para parametriza-lo de forma a que cumpra todas as suas especificações. A TPU M220 oferece dois tipos de acesso:

- Utilizador
- Administrador

O diagrama ilustrado na figura 4.3 apresenta o acesso em modo utilizador, para este caso as opções oferecidas pelo dispositivo são meramente informativas, estando assim o utilizador impossibilitado de configurar qualquer um dos parâmetros do sistema.

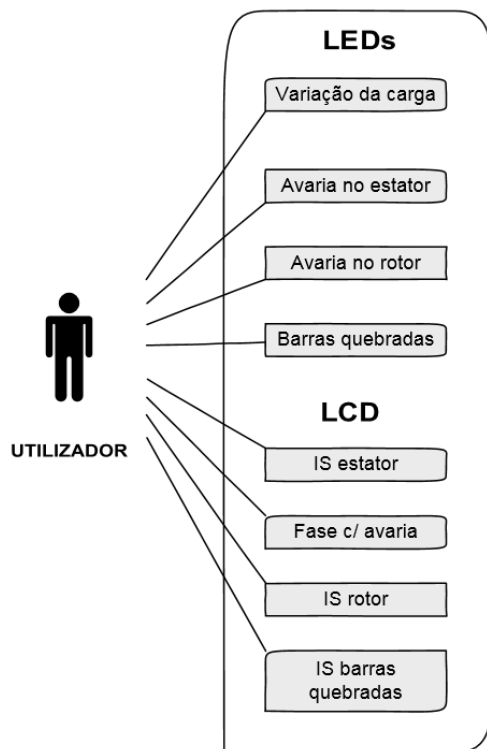


Figura 4.3: Acesso á TPU M220 em modo utilizador.

Os LEDs instalados no painel frontal da TPU funcionam como alarmes meramente visuais que fornecem as seguintes informações:

- **Variação de carga** - Caso a variância calculada apresente um valor superior ao limite definido este LED acende
- **Avaria no estator** - Se o IS do estator obtido pelo sistema for superior ao limite especificado o LED acende indicando que existe possibilidade de avaria no estator
- **Avaria no rotor** - O LED acende se o IS do rotor for superior ao limite definido indicando a possibilidade de avaria
- **Barras quebradas** - Caso o IS calculado pelo sistema ultrapasse o limite estabelecido o LED acende indicando a suspeita de avaria nas barras do rotor

A partir do LCD do dispositivo o utilizador tem á sua disposição um diagnóstico visual mais detalhado acerca do estado do motor:

- **IS estator** - apresenta o valor do índice de severidade de avaria no estator obtido pelo sistema

- **Fase c/ avaria** - caso exista a possibilidade de avaria no estator, este campo indica a fase que provavelmente está danificada
- **IS rotor** - apresenta o valor do índice de severidade de avaria no rotor obtido pelo sistema
- **IS barras quebradas** - apresenta o valor do índice de severidade de avaria nas barras do rotor obtido pelo sistema

A figura 4.4 apresenta o diagrama de casos relativo ao acesso á TPU em modo administrador, é nesta opção que após introduzir uma password passa a ser possível configurar alguns dos parâmetros do sistema.

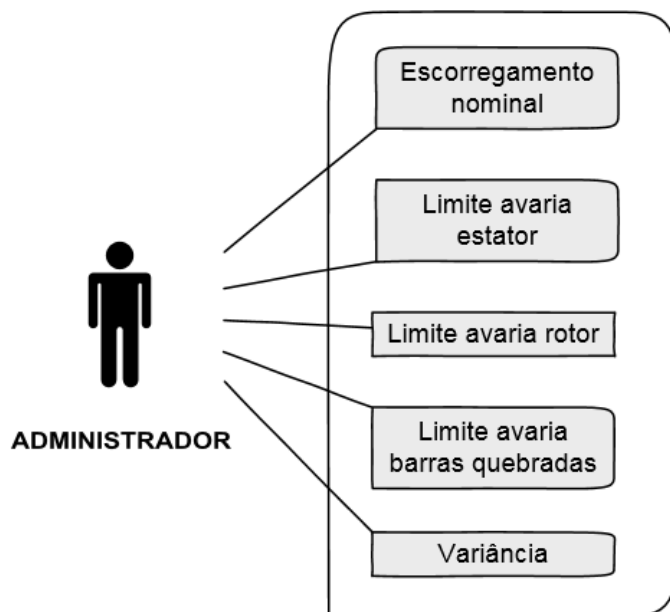


Figura 4.4: Acesso á TPU M220 em modo administrador.

Para ter acesso ao modo administrador é também necessário que a tecla F1 esteja ativa. Reunidas todas as condições o administrador passa a ter a possibilidade de configurar os seguintes parâmetros:

- **Escorregamento nominal** - valor indicado na chapa de características do motor a partir do qual o domínio do espectro do quadrado da corrente é definido pelo sistema
- **Limite avaria estator** - valor a partir do qual o sistema ativa o alarme de avaria no estator
- **Limite avaria rotor** - valor a partir do qual o sistema ativa o alarme de avaria no rotor

- **Limite avaria barras quebradas** - valor a partir do qual o sistema ativa o alarme de barras quebradas
- **Variância** - parâmetro que limita a variação de carga do motor

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos durante os ensaios laboratoriais. É também feita uma breve apresentação e descrição das avarias provocadas nos motores, assim como de toda a montagem experimental utilizada durante o processo, e que permitiu estudar o desempenho do SDDF com a maior precisão possível.

5.1 Montagem experimental

Para verificar a fiabilidade e o comportamento, em tempo real, do SDDF desenvolvido, foi utilizada uma montagem experimental que permitiu simular o ambiente industrial e algumas das avarias a que o motor pode estar exposto durante o seu período de atividade.

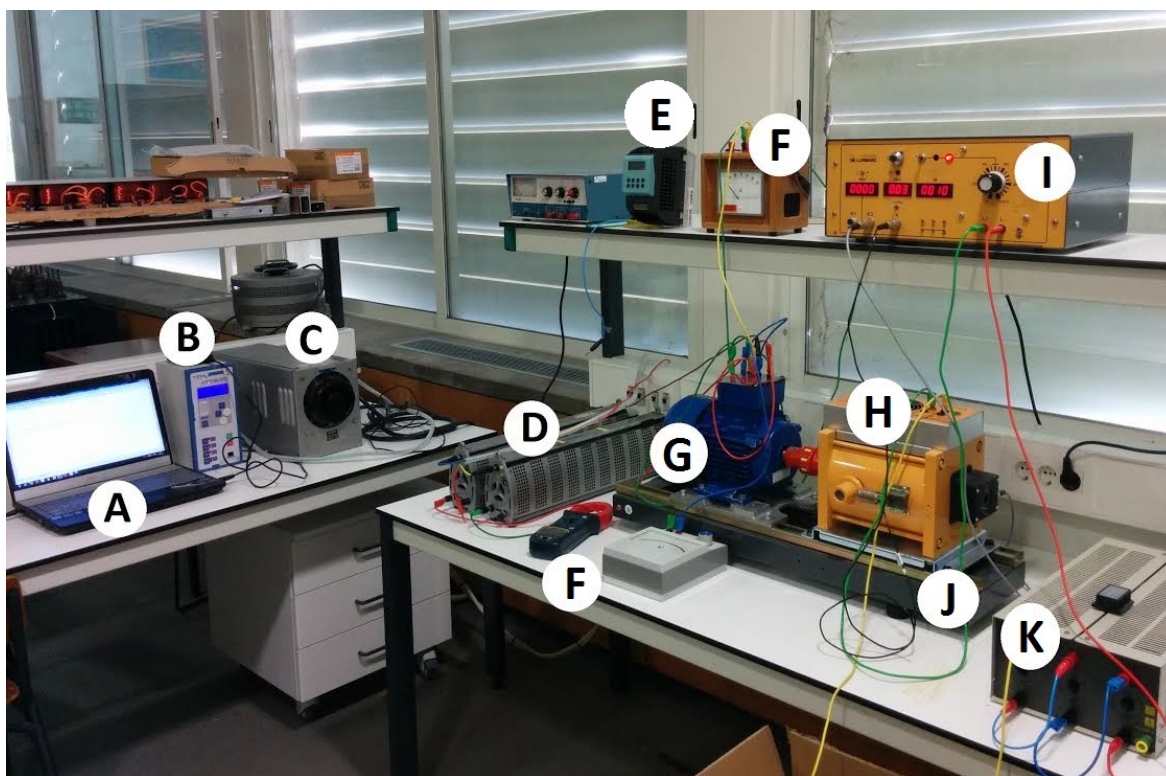


Figura 5.1: Montagem experimental utilizada.

As letras assinaladas na figura 5.1 correspondem ao material utilizado na montagem experimental:

- **A** - Computador portátil
- **B** - Relé digital TPU M220
- **C** - Auto-transformador
- **D** - Resistências variáveis
- **E** - Inversor SIEMENS (Sinamics g110)
- **F** - Dispositivos de medição:
 - Pinça amperimétrica
 - Voltímetro analógico
 - Wattímetro analógico
- **G** - Motor de indução trifásico
- **H** - Travão eletromagnético
- **I** - Dispositivo de medição de velocidade, binário, potência e controlador de carga
- **J** - Suporte para motores
- **K** - Resistências de controlo de carga

Durante os ensaios foram utilizados três motores de indução trifásicos de baixo custo da marca Guanglu (figura 5.2). Uma vez que são utilizados para fins didáticos e também de forma a oferecer maior segurança ao utilizador as caixas de terminais foram alteradas.

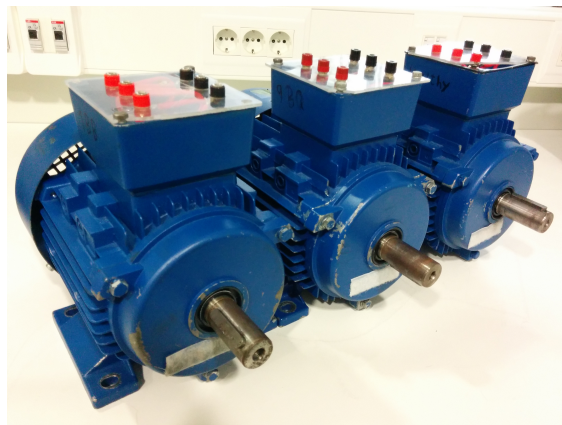


Figura 5.2: Motores de indução trifásicos da marca Guanglu.

De acordo com a chapa de características (figura 5.3) tratam-se de motores com:

- Um par de polos
- Velocidade nominal: 2850 rpm
- Tensão nominal: 230/400 V
- Corrente nominal: 5.71/3.28 A
- Potência nominal: 1.5 kW
- $\cos\phi$: 0.84

De forma a garantir o máximo desempenho dos motores, estes foram ligados em triângulo e por isso alimentados com uma tensão fixa de 230 V.



Motores Electricos					
IS.CL.F	IP 55	S 1	Cos ϕ 0,84		
TIPO GL-90S-2 B3					
V	Hz	HP	kW	rpm	A
230	50	2	1.5	2850	5.71
400	50	2	1.5	2850	3.28

www.slepinet.com

Figura 5.3: Chapa de características dos motores (adaptado de [5]).

As velocidades foram registadas com base nos valores obtidos pela unidade de medição da marca De Lorenzo (figura 5.4). Além de dispositivo de medição esta unidade possui um controlador de corrente contínua que é utilizado para controlar o travão eletromagnético.

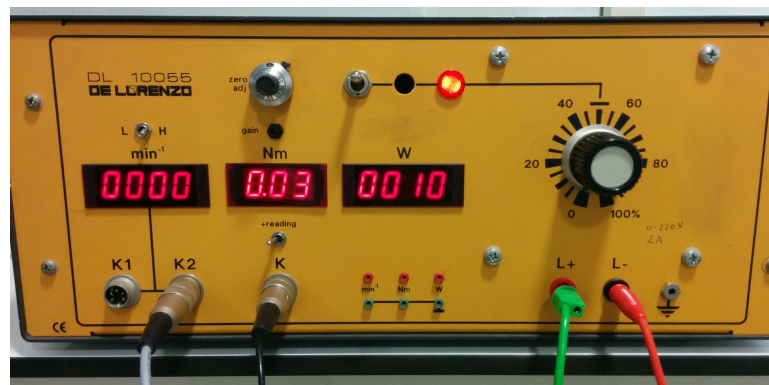


Figura 5.4: Unidade de medição e controlo de carga De Lorenzo.

5.2 Avarias provocadas

De forma a simular algumas das situações adversas a que o motor está sujeito durante o seu ciclo de vida foram provocadas artificialmente as seguintes avarias:

- **Curto-circuito de um enrolamento do estator**

De forma a simular a avaria numa das fases do motor foram utilizadas duas resistências variáveis de $12,5\ \Omega/10\ A$ ligadas em série aos enrolamentos do estator. O objetivo era simular um curto-circuito na fase B e para tal as fases A e C do motor foram ligadas em série a cada uma das resistências (figura 5.5). Durante os ensaios, o valor das resistências foi alterado para $4\ \Omega$, $8\ \Omega$ e $10\ \Omega$ de forma a agravar a avaria e assim testar o sistema para três níveis de gravidade.

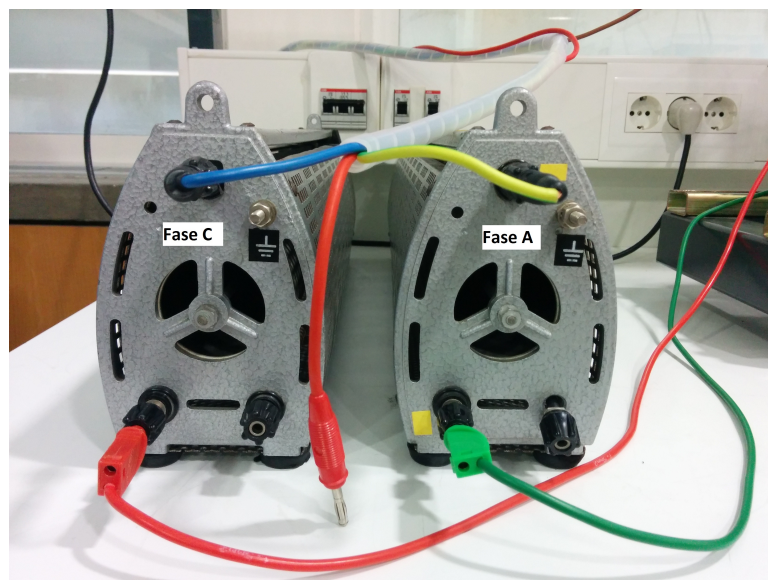


Figura 5.5: Resistências utilizadas para provocar avaria numa das fases do estator.

- **Barras quebradas do rotor**

Para a falha no rotor, foram perfuradas com um berbequim, as barras de dois rotores. Num foram perfuradas duas barras e noutra foram perfuradas nove barras. Estes dois rotores foram perfurados para ensaios realizados em [4, 5] e reaproveitados para esta dissertação.



Figura 5.6: Rotor perfurado para provocar avaria nas barras (adaptado de [5]).

- **Excentricidades**

Para provocar excentricidades no eixo foi construído um disco metálico que foi acoplado entre o motor e o travão eletromagnético e ao qual foram acrescentados pesos de forma a variar o grau da avaria (figura 5.7). Foram utilizados três pesos diferentes:

- Peso pequeno - 175g
- Peso médio - 235g
- Peso grande - 310g

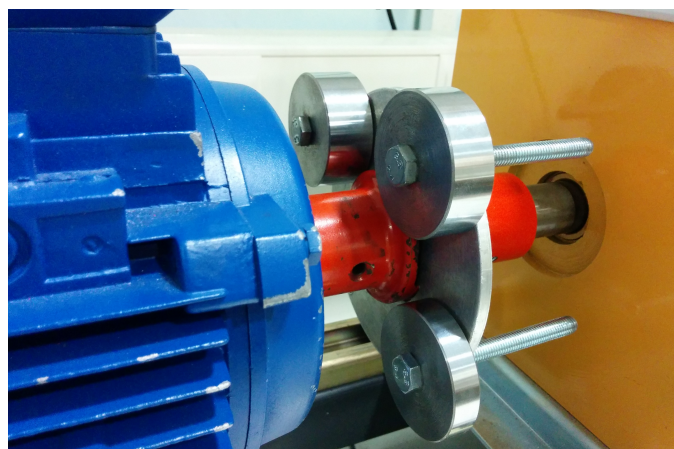


Figura 5.7: Disco metálico e pesos utilizados para provocar a excentricidade no eixo.

5.3 Alimentação a partir da rede (com auto-transformador)

Neste subcapítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos a partir dos ensaios realizados. Durante todo o processo os motores foram ligados em triângulo e alimentados por um auto-transformador.

Para cada tipo de avaria foram realizados cinco ensaios, em cada ensaio a carga aplicada ao motor foi variada a partir de um controlador de travão. Os ensaios foram realizados a 53%, 60%, 67%, 73% e 80% da potência nominal do motor que correspondem respetivamente a, 800W, 900W, 1000W, 1100W e 1200W. Durante os ensaios foi assegurada uma tensão de alimentação de 230V correspondente á tensão nominal do motor com ligação em triângulo.

5.3.1 Motor saudável

A partir das amostras de corrente recolhidas pela TPU M220 e utilizando o programa *Matlab*® como ferramenta principal de trabalho, foram construídos os gráficos em seguida apresentados, que permitiram fazer a análise detalhada dos ensaios.

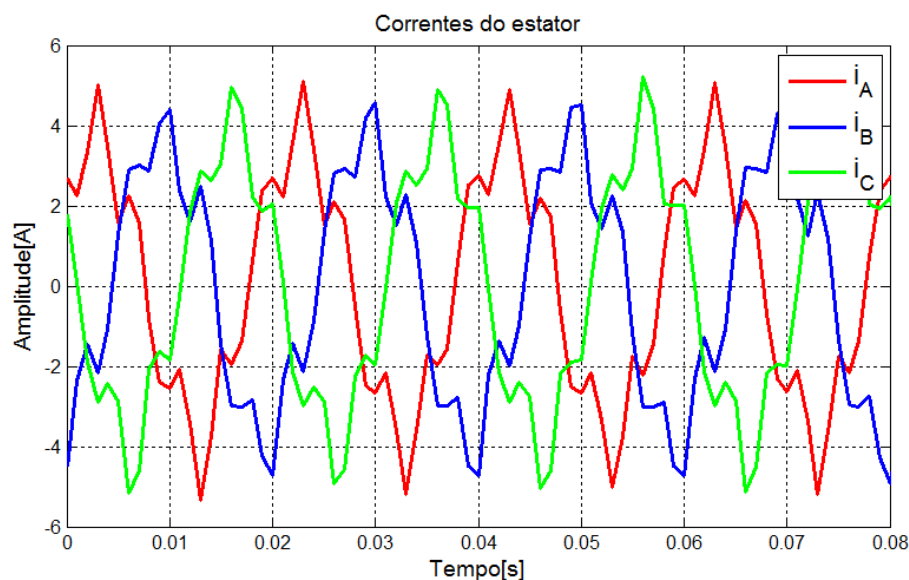


Figura 5.8: Correntes de linha do motor saudável a 67% da potência nominal.

Analisando as correntes da figura 5.8 verifica-se que mesmo não tendo sido simulada qualquer avaria, estas não são sinusoidais como seria esperado. Tal deve-se ao facto de o motor utilizado se tratar um motor de baixo custo, fabricado a partir de materiais de baixa qualidade que vão influenciar diretamente as correntes, provocando-lhes uma distorção harmónica considerável.

Observando os vetores próprios (figura 5.9 (b)) verifica-se que estes não assumem uma direção preferencial e a sua distribuição faz prever um padrão de forma circular. Contudo, o padrão descrito pelas correntes deixará de ser uma circunferência perfeita e assume uma forma semelhante a uma estrela hexagonal (figura 5.9 (a)) centrada no plano xyz.

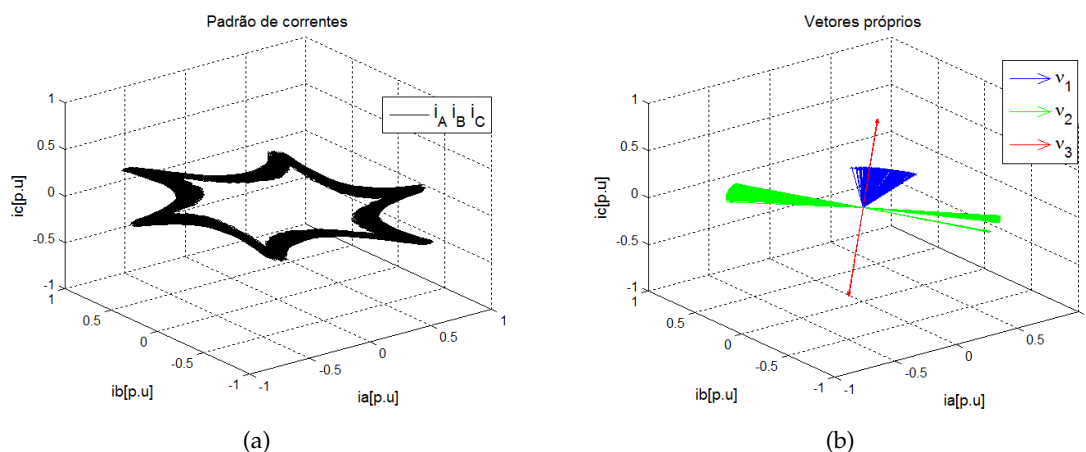


Figura 5.9: (a) Padrão descrito pelas correntes (b) vetores próprios do motor saudável a 67% da potência nominal.

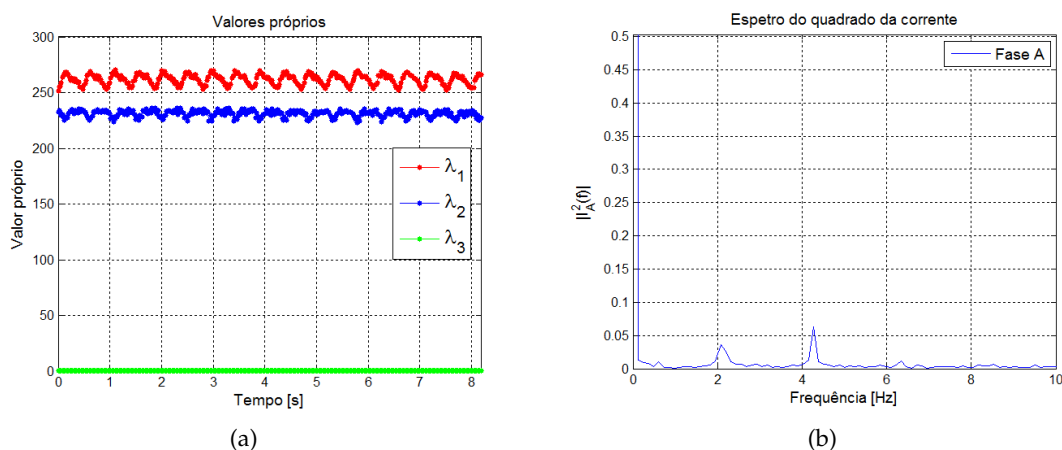


Figura 5.10: (a) Valores próprios (b) espectro do quadrado da corrente do motor saudável a 67% da potência nominal.

Devido á distorção harmónica presente nas corrente e também a pequenos desequilíbrios nos enrolamentos do estator, contrariamente ao esperado, os valores próprios do motor não são iguais nem constantes no tempo (figura 5.10 (a)) e apresentam uma ligeira distância entre si.

No espectro do quadrado da corrente (figura 5.10 (b)) são visíveis alguns picos em frequências típicas de avarias nas barras do rotor, uma vez mais, tal pode dever-se á distorção harmónica das correntes e/ou também a defeitos de construção do rotor.

Na figura 5.11 são apresentados os índices de severidade obtidos para os diferentes níveis de potência experimentados pelo motor.

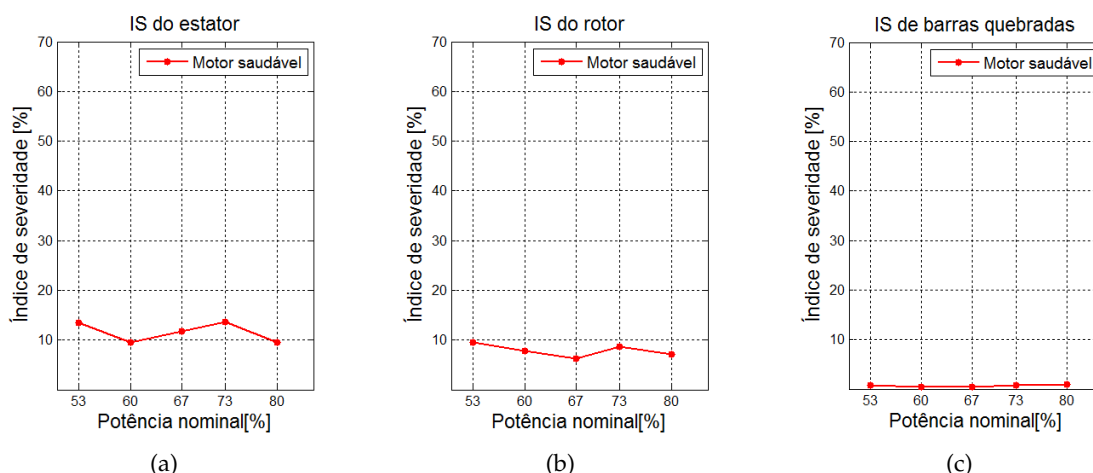


Figura 5.11: Variação dos índices de severidade do (a) estator (b) rotor (c) barras quebradas do motor saudável, em função da potência.

Como o gráfico dos valores próprios fazia prever, o IS do estator apresenta um valor diferente de zero para todos os níveis de potência testados, contudo os valores apresentados são relativamente baixos e é assumido que o motor não possui qualquer tipo de avaria no estator.

Pelo facto de os valores próprios não serem constantes no tempo, os IS do rotor vão apresentar valores não nulos ao longo da variação da carga. Sendo também estes valores bastante pequenos, o motor é classificado como não tendo qualquer tipo de avaria no rotor e portanto saudável.

Por razões referidas anteriormente, os IS de barras quebradas também apresentam valores não nulos mas neste caso muito próximos de zero, sugerindo também o diagnóstico de um motor saudável.

5.3.2 Avaria no estator

Como referido no subcapítulo 5.2, para provocar uma avaria numa das fases do motor, foram utilizadas duas resistências variáveis em série com os enrolamentos do estator de forma a desequilibrar a fase desejada. No decorrer dos ensaios o valor das resistências foi alterado por três vezes. Por abuso de linguagem, neste capítulo cada valor de resistência é classificado como sendo um nível de avaria:

- **Nível A** - $4\ \Omega$
- **Nível B** - $8\ \Omega$
- **Nível C** - $10\ \Omega$

Seguidamente são apresentados os resultados obtidos a partir das amostras recolhidas pela TPU M220 com o motor em funcionamento a 67% da potência nominal e com uma avaria de nível C na fase B (fases A e C em série com resistência de $10\ \Omega$).

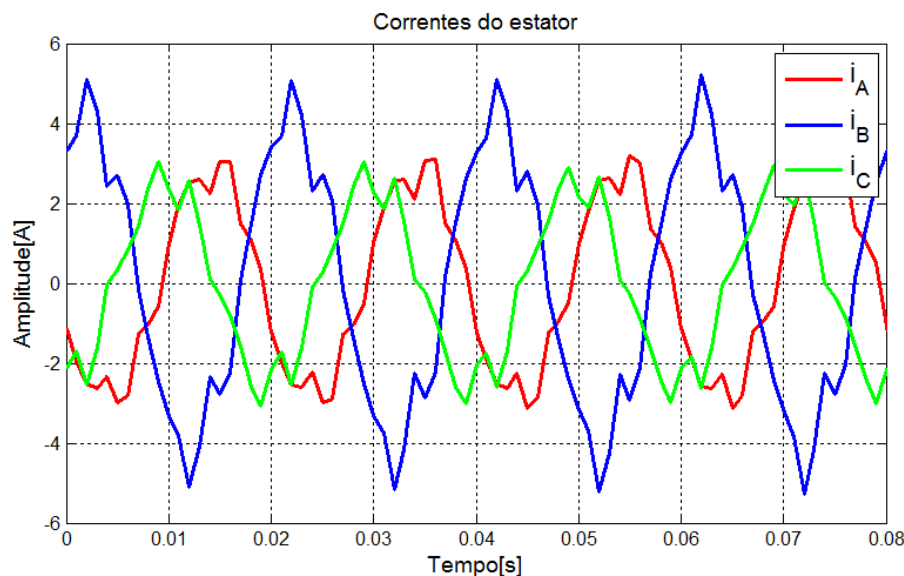


Figura 5.12: Correntes de linha do motor com avaria no estator a 67% da potência nominal.

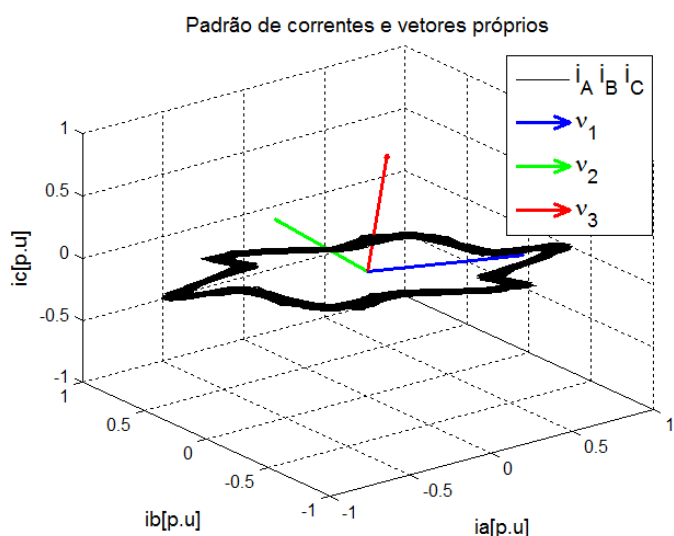


Tabela 5.1: Vetores próprios do motor com avaria no estator.

	\vec{v}_1	\vec{v}_2	\vec{v}_3
\vec{e}_A	0.4525	-0.6791	0.5780
\vec{e}_B	-0.8143	-0.0506	0.5782
\vec{e}_C	0.3634	0.7323	0.5759

Figura 5.13: Padrão descrito pelas correntes e vetores próprios do motor com avaria no estator a 67% da potência nominal.

Tal como é referido no capítulo 3, para um motor com avaria no estator é expectável que as suas correntes de linha descrevam um padrão elíptico. A figura 5.13 representa o padrão de correntes obtido para o motor a 67% da potência nominal com uma avaria de nível C na fase B. Embora numa primeira análise, devido á distorção harmónica, não seja evidente que o padrão descreve uma elipse, é visível que este está orientado segundo a direcção do vetor próprio principal \vec{v}_1 . De acordo com [6] o vetor próprio principal é aquele que tem associado o maior valor próprio, neste caso λ_1 (figura 5.14(a)) e a fase afetada pode

ser identificada pela análise das suas componentes \vec{e}_A , \vec{e}_B e \vec{e}_C (A, B, C correspondem às fases do motor). A componente de maior módulo corresponde à fase com avaria. Na tabela 5.1 são apresentados os valores das componentes de cada vetor próprio. Para o vetor próprio principal \vec{v}_1 é a componente \vec{e}_B a que apresenta o maior valor em módulo, e por isso conclui-se que o sistema faz um diagnóstico correto da fase defeituosa.

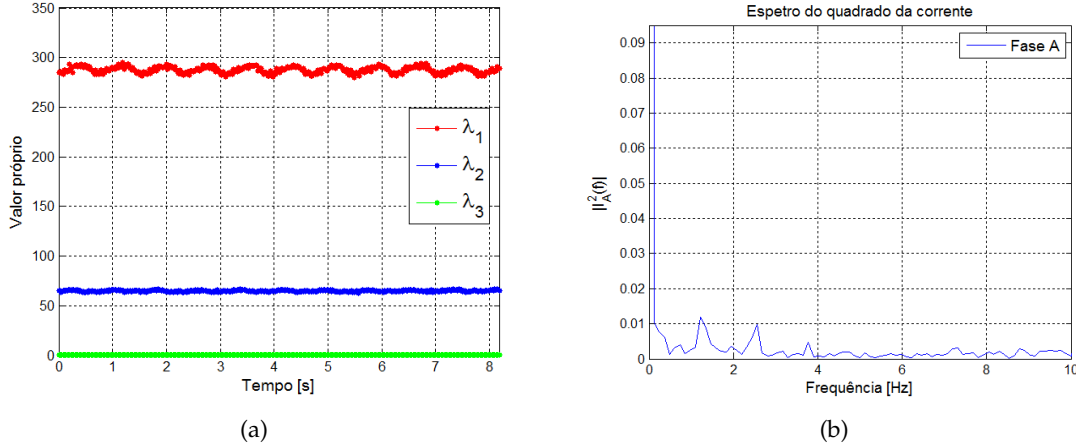


Figura 5.14: (a) Valores próprios (b) espectro do quadrado da corrente do motor com avaria no estator a 67% da potência nominal.

De forma a entender o comportamento do padrão descrito pelas correntes foram simuladas avarias nas restantes fases do motor. A figura 5.15 (a), (b) e (c) representa, respetivamente, os padrões de corrente do motor com avaria nas fases A, B e C.

Tabela 5.2: Valores do vetor próprio principal nos três casos de avaria.

	Fase A	Fase B	Fase C
\vec{e}_A	-0.8146	0.4525	-0.3524
\vec{e}_B	0.3559	-0.8143	-0.4592
\vec{e}_C	0.4579	0.3634	0.8155

Como pode ser observado na figura 5.15, em todos os casos o padrão é orientado pela direção do vetor próprio principal \vec{v}_1 . A tabela 5.2 contém os valores das três componentes do vetor próprio principal em cada caso de avaria. Analisando a tabela verifica-se, uma vez mais, que a componente de maior valor em módulo corresponde efetivamente à fase com avaria e portanto o diagnóstico é efetuado com sucesso para os três casos.

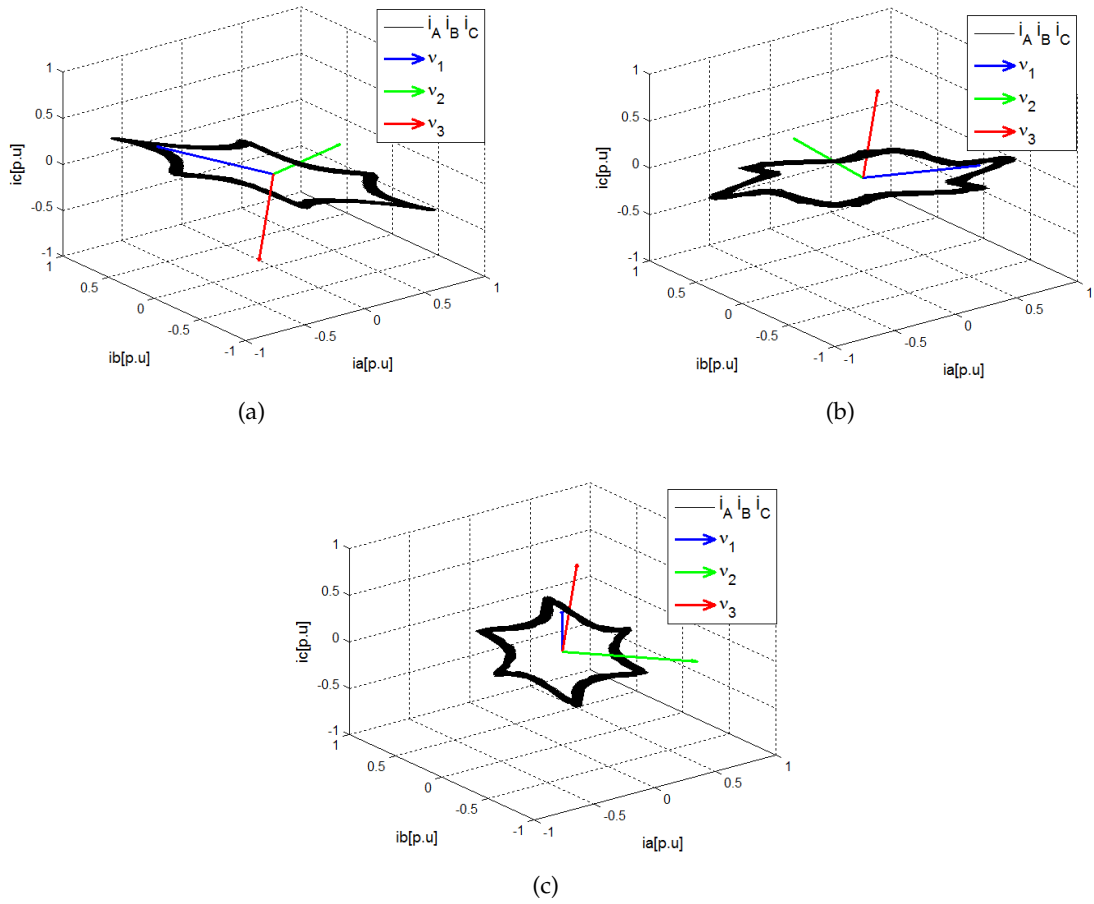


Figura 5.15: Padrão descrito pelas correntes do motor com avaria na (a) fase A (b) fase B (c) fase C.

Para que fosse possível estudar a evolução do padrão de correntes em função da severidade da falha foram aplicadas ao estator do motor três avarias de gravidade distinta.

A figura 5.16 apresenta o padrão de correntes do motor a 67% da potência nominal para os três níveis de avaria na fase B. Observando as figuras é visível uma relação de proporcionalidade entre o raio do padrão e a gravidade da avaria, este fenómeno está diretamente relacionado com os valores próprios das correntes.

Na figura 5.17 está representada a evolução temporal dos valores próprios das correntes nos três casos de avaria. Com o agravar da situação torna-se evidente o aumento da distância entre os valores próprios λ_1 e λ_2 . Este aumento faz, consequentemente, prever uma subida dos índices de severidade do estator.

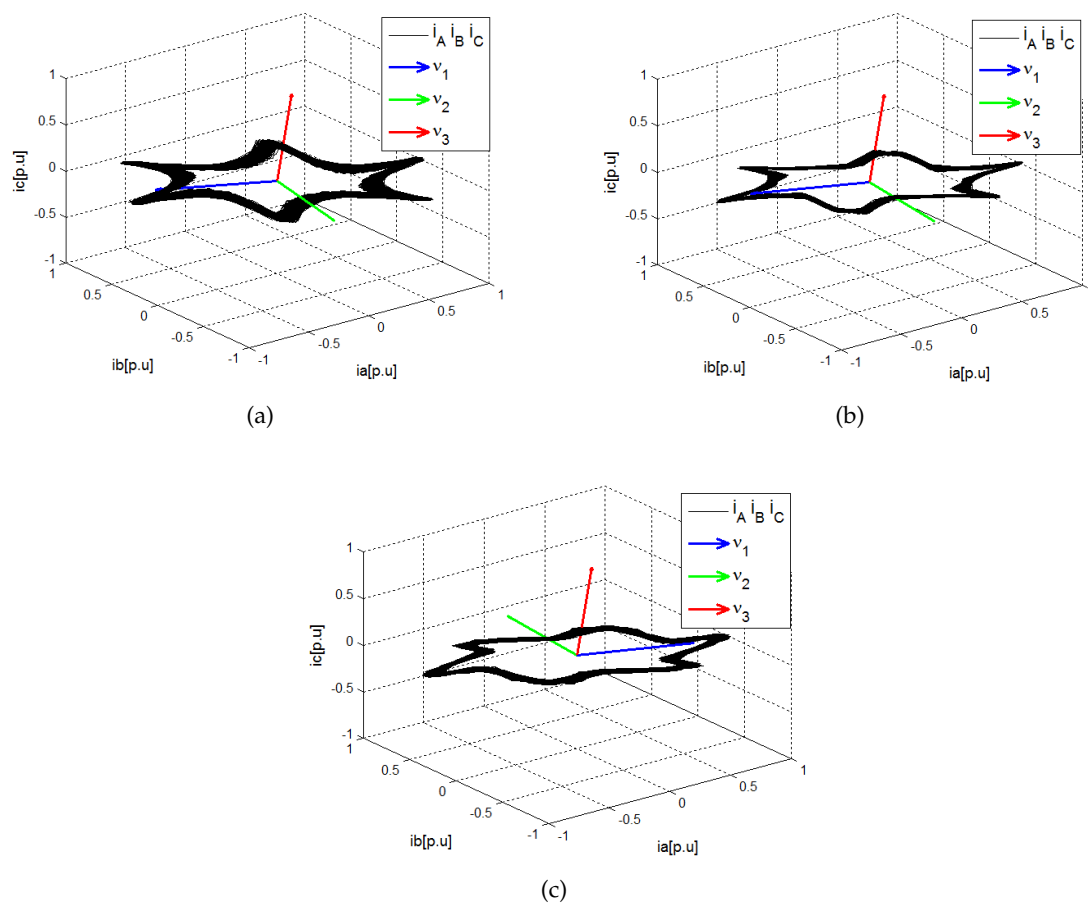


Figura 5.16: Padrão descrito pelas correntes para diferentes níveis de avaria (a) nível A (b) nível B (c) nível C.

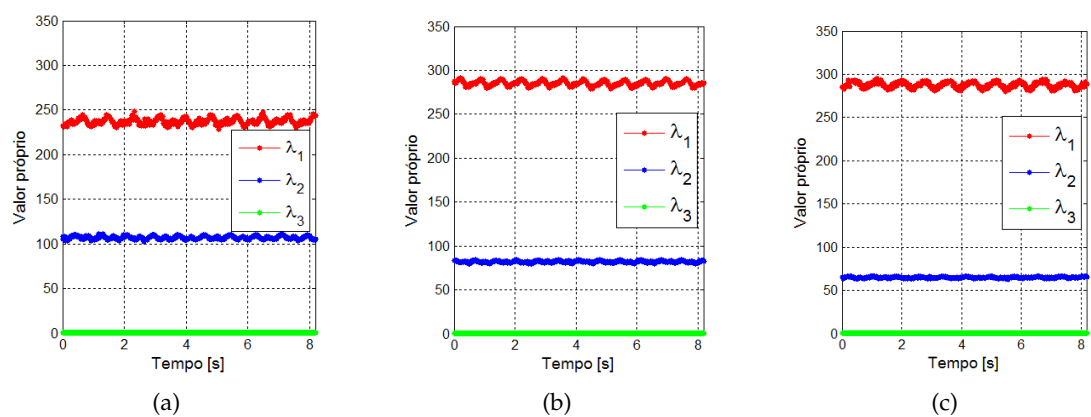


Figura 5.17: Valores próprios das correntes para os diferentes níveis de avaria (a) nível A (b) nível B (c) nível C.

Na figura 5.18 estão representados os índices de severidade obtidos pelo sistema para o motor com avaria no estator.

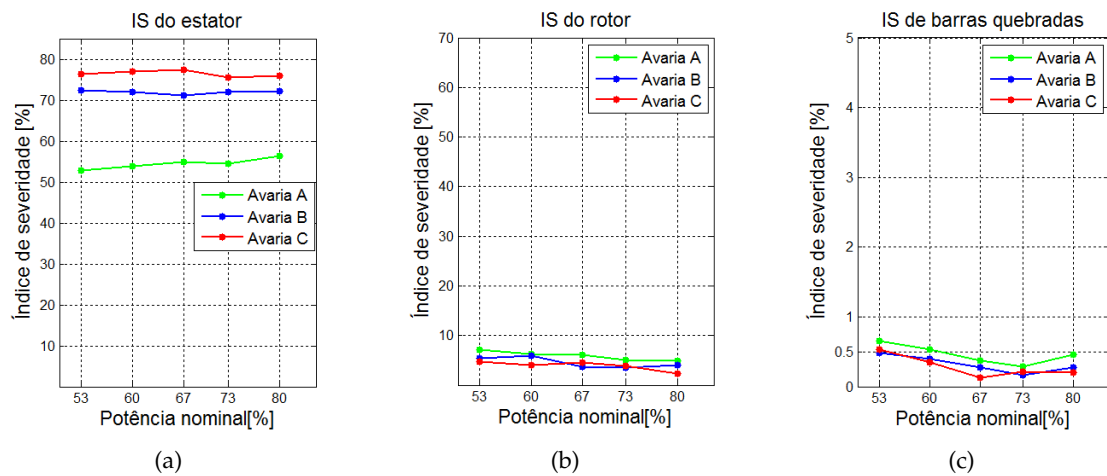


Figura 5.18: Variação dos índices de severidade do (a) estator (b) rotor (c) barras quebradas do motor com avaria no estator, em função da potência.

De acordo com a evolução da gravidade da avaria, o sistema registou um aumento significativo do IS do estator. O gráfico apresenta também uma relação de proporcionalidade condizente com o aumento da distância entre os valores próprios verificada anteriormente. De realçar que os valores do IS obtidos para cada nível de avaria mantêm-se praticamente constantes com o aumento da carga do motor. A comparação com os índices de severidade do estator registados no motor saudável, que variam entre os 10 e os 20%, leva a concluir que o sistema faz um diagnóstico coerente e bastante satisfatório da situação.

Tanto o IS do rotor como o IS de barras quebradas, os dois apresentam valores relativamente baixos e semelhantes aos obtidos para o motor saudável, não apresentando qualquer tipo de alteração significativa com o agravar da avaria ou mesmo com o aumento da carga do motor. Considera-se uma vez mais que para os dois casos o sistema faz um diagnóstico correto da situação.

5.3.3 Avaria no rotor

De forma a ensaiar o SDDF na presença de falhas no rotor, foram perfuradas as barras condutoras de dois rotores saudáveis. Os ensaios laboratoriais foram realizados para o motor com:

- 2 Barras quebradas - 2BQ
- 9 Barras quebradas - 9BQ

Os resultados em seguida apresentados foram obtidos a partir de amostras de corrente recolhidas pela TPU M220 com o motor em funcionamento a 67% da carga nominal.

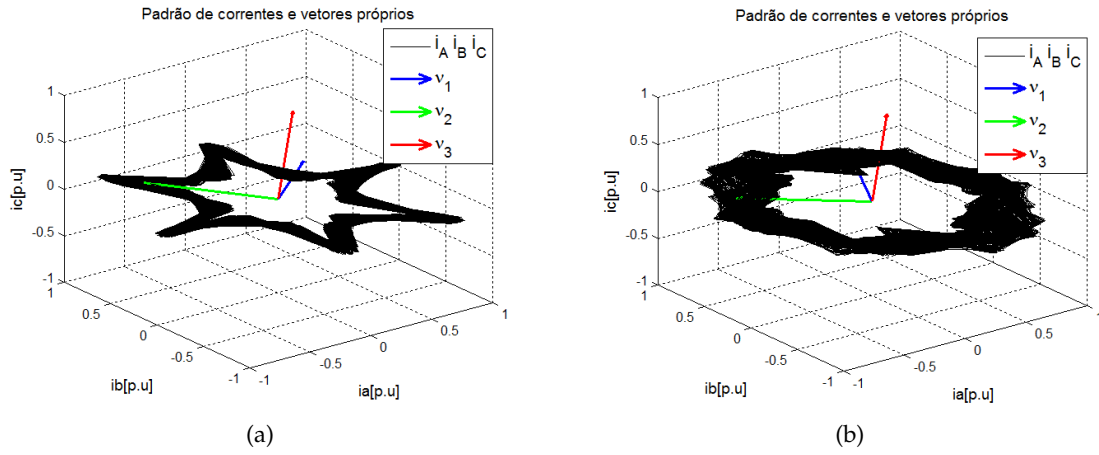


Figura 5.19: Padrão descrito pelas correntes e vetores próprios do motor com avaria no rotor a 67% da potência nominal: (a) 2 BQ (b) 9 BQ.

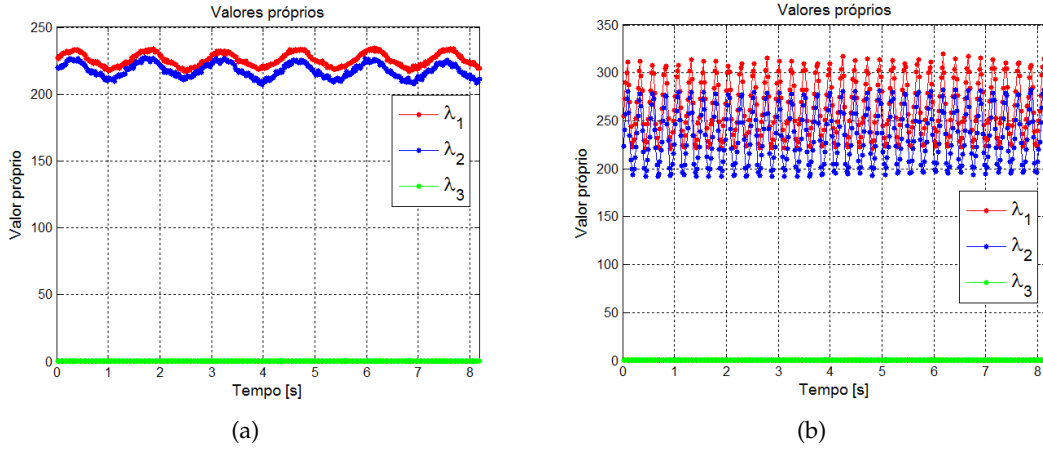


Figura 5.20: Valores próprios do motor com avaria no rotor a 67% da potência nominal: (a) 2 BQ (b) 9 BQ.

De acordo com [6], em situações de avaria do rotor as correntes de linha do motor tendem a descrever padrões semelhantes a um donut. A figura 5.19 apresenta os padrões descritos pelas correntes nas situações de 2BQ e 9BQ. Embora só no caso de 9BQ o padrão se comece a assemelhar verdadeiramente a um donut é evidente que em comparação com os padrões vistos nos exemplos anteriores, estes apresentam uma espessura consideravelmente maior que verifica o "efeito donut" esperado. Esta alteração de forma dá-se devido à evolução temporal dos valores próprios. À semelhança dos valores próprios obtidos para o motor saudável, os valores obtidos neste ensaio apresentam apenas uma ligeira distância entre si. Não obstante, no caso do motor com barras quebradas a evolução temporal dos valores próprios assume um comportamento sinusoidal (figura 5.20) devido às baixas frequências de avaria induzidas nas correntes do estator (equação 2.4). As amplitudes máximas deste comportamento sinusoidal aumentam com o agravar da avaria e consequentemente provocarão um aumento IS do rotor.

A tabela seguinte apresenta as frequências de barras quebradas calculadas pela equação 2.4 a partir dos valores de velocidade e escorregamento registados pela unidade de medição nos ensaios do motor a 67% da potência nominal.

Tabela 5.3: Dados experimentais registados nos ensaios do motor com avaria no rotor.

	Ω [rpm]	s	f_{BQ1} [Hz]	f_{BQ2} [Hz]
2BQ	2970	0.01	49	51
9BQ	2880	0.04	46	54

Na figura 5.21 estão representados os espectros de corrente do motor e também as frequências de barras quebradas identificadas pelo sistema. Comparando as frequências obtidas em cada um dos casos com os valores teóricos apresentados na tabela 5.3 verifica-se que o sistema faz uma análise bastante precisa dos espectros de corrente.

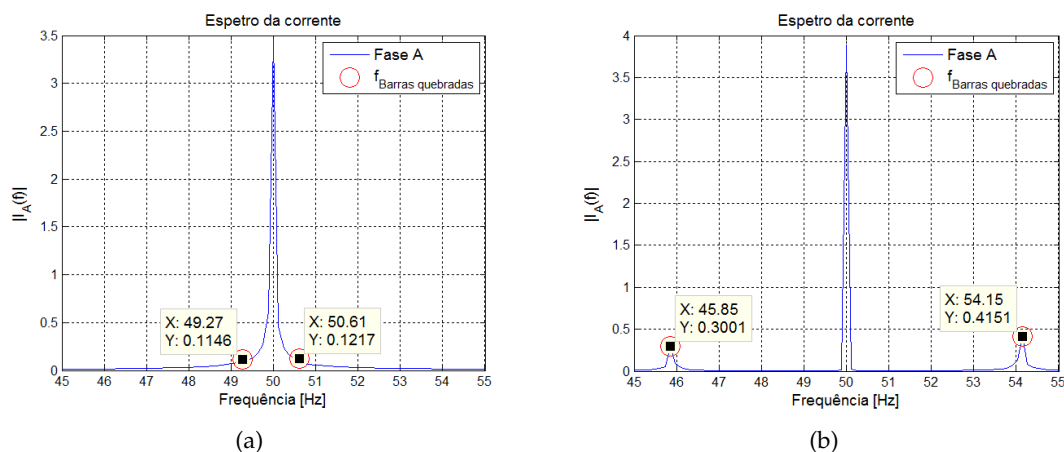


Figura 5.21: Espectro da corrente do motor com avaria no rotor a 67% da potência nominal: (a) 2 BQ (b) 9 BQ.

Como resultado da FFT aplicada ao quadrado da corrente foram obtidos os espectros da figura 5.22. É com base nestes espectros que é obtido o IS de barras quebradas (calculado para todos os casos anteriores de avaria) e que serve essencialmente para complementar o diagnóstico de avaria no rotor.

Analisando as duas imagens verifica-se que com o agravamento da avaria existe um aumento proporcional entre a amplitude do sinal na frequência de barras quebradas e a amplitude do sinal na frequência da componente contínua ($f = 0$). Uma vez que o IS é calculado a partir das duas amplitudes, é esperado que este aumente consideravelmente com o número de barras danificadas.

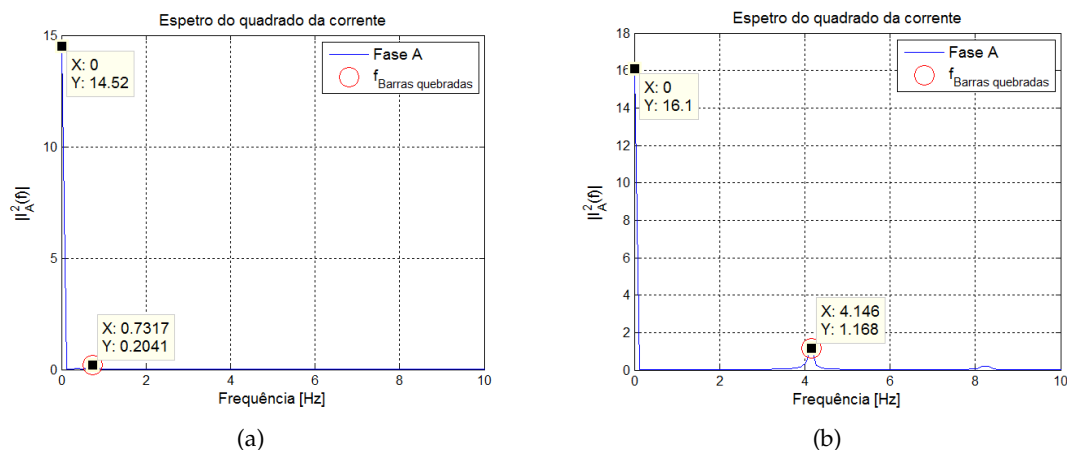


Figura 5.22: Espectro do quadrado da corrente do motor com avaria no rotor a 67% da potência nominal: (a) 2 BQ (b) 9 BQ.

Repetiram-se os ensaios para os dois casos de avaria variando a carga do motor. Destes ensaios resultaram os IS apresentados na figura 5.23.

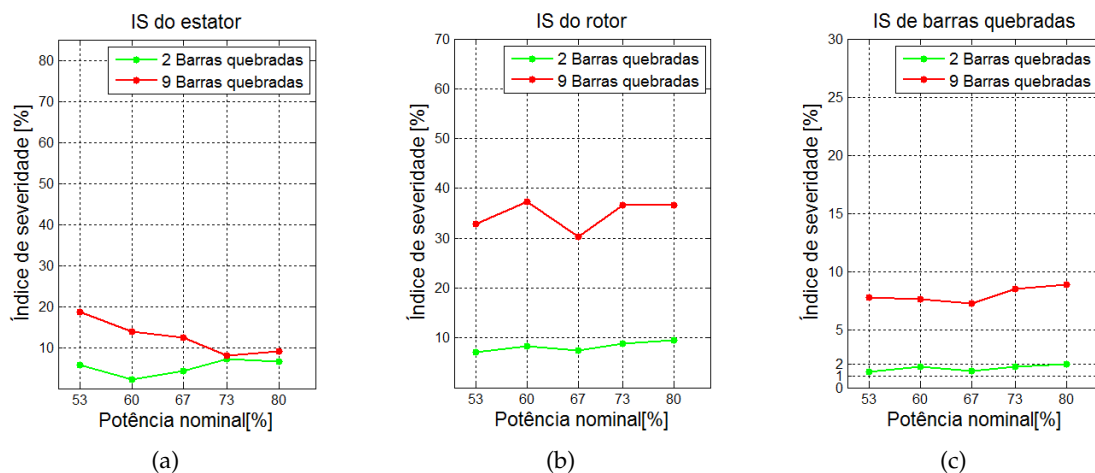


Figura 5.23: Variação dos índices de severidade do (a) estator (b) rotor (c) barras quebradas do motor com avaria no rotor, em função da potência.

Na figura, os valores do IS do estator obtidos pelo SDDF para os dois casos de avaria são relativamente baixos e semelhantes aos valores obtidos para o motor saudável, por essa razão oferecem um diagnóstico correto da condição do estator.

Relativamente ao IS do rotor, os valores registados para 2BQ são semelhantes aos valores obtidos quer para o motor saudável, quer para o motor com avaria no estator e por isso a probabilidade de um diagnóstico incorreto é bastante elevada. Por outro lado, para 9BQ os valores obtidos pelo sistema são bastante fiáveis e levam a concluir que o IS do

rotor apenas está apto a diagnosticar avarias de maior gravidade.

Já o IS de barras quebradas fornece uma informação coerente do estado do rotor para os dois casos. Além de não sofrer variações significativas com o aumento da carga do motor, apresenta ainda uma avaliação proporcional ao número de barras quebradas.

5.3.4 Excentricidades

No subcapítulo 5.2 está descrito o método utilizado na simulação da avaria do motor por excentricidade. Para este tipo de avaria foram realizados ao SDDF três ensaios diferentes. Em cada ensaio foi adicionado ao disco um peso total diferente:

- Ensaio 1 - 410g
- Ensaio 2 - 545g
- Ensaio 3 - 720g

Os dados de seguida apresentados foram obtidos a partir das amostras recolhidas pela TPU M220 durante o ensaio 3 com o motor em funcionamento a 67% da sua potência nominal.

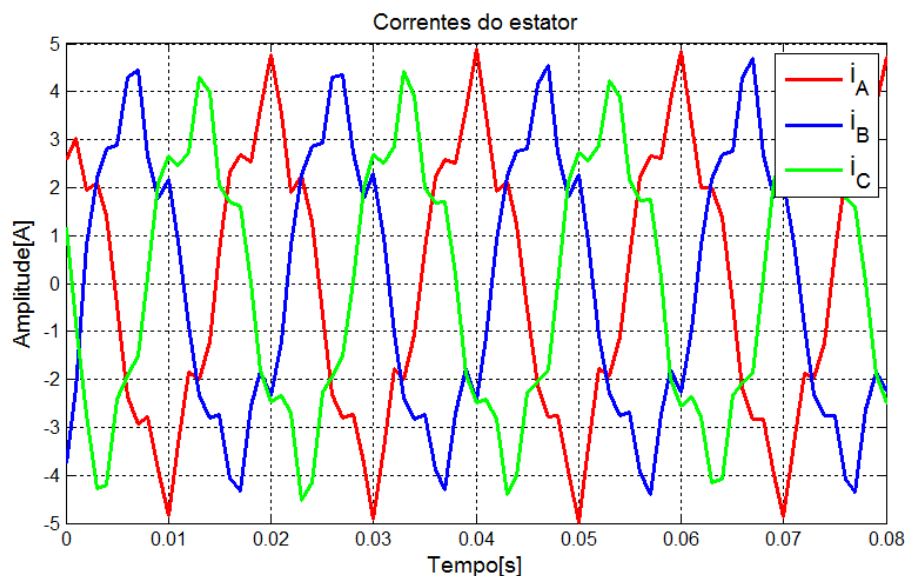


Figura 5.24: Correntes de linha do motor com excentricidade a 67% da potência nominal.

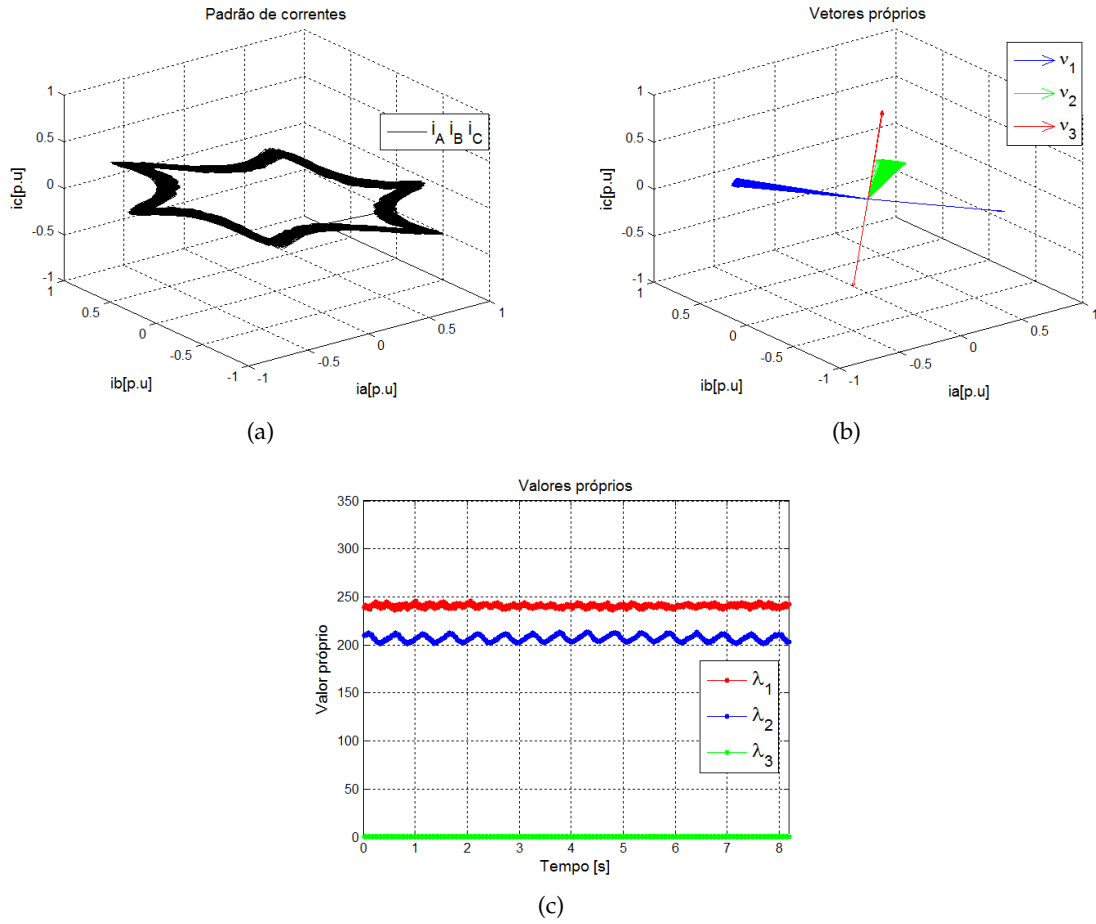


Figura 5.25: (a) Padrão descrito pelas correntes (b) vetores próprios (c) valores próprios do motor com excentricidade a 67% da potência nominal.

Numa primeira análise ao padrão descrito pelas correntes do motor não é visível qualquer alteração significativa. Tal como os vetores e os valores próprios, representados na figura 5.25, os três apresentam um comportamento semelhante ao caso de um motor saudável. Por essa razão, nas figuras 5.26 e 5.27 os espectros de corrente e do quadrado da corrente, respetivamente, são sobrepostos aos espectros obtidos anteriormente durante o ensaio do motor saudável a 67% da potência nominal.

Tal como no caso de avaria por barras quebradas, as avarias por excentricidade induzem frequências nas correntes estatóricas. Essas frequências são dadas pela equação:

$$f_{\text{Excentricidade}} = f \pm k \cdot f_r \quad (5.1)$$

Para o quadrado da corrente a equação anterior passa a ser dada por:

$$f_{\text{Excentricidade}} = 2 \cdot f \pm k \cdot f_r \quad (5.2)$$

Na análise do espectro de corrente obtido as frequências de excentricidade da equação 5.1 não são identificáveis. O mesmo se sucede no espectro do quadrado da corrente. Nos dois casos o espectro obtido para o motor com excentricidade é bastante semelhante ao obtido anteriormente para o motor saudável não sendo visível qualquer alteração significativa de comportamento.

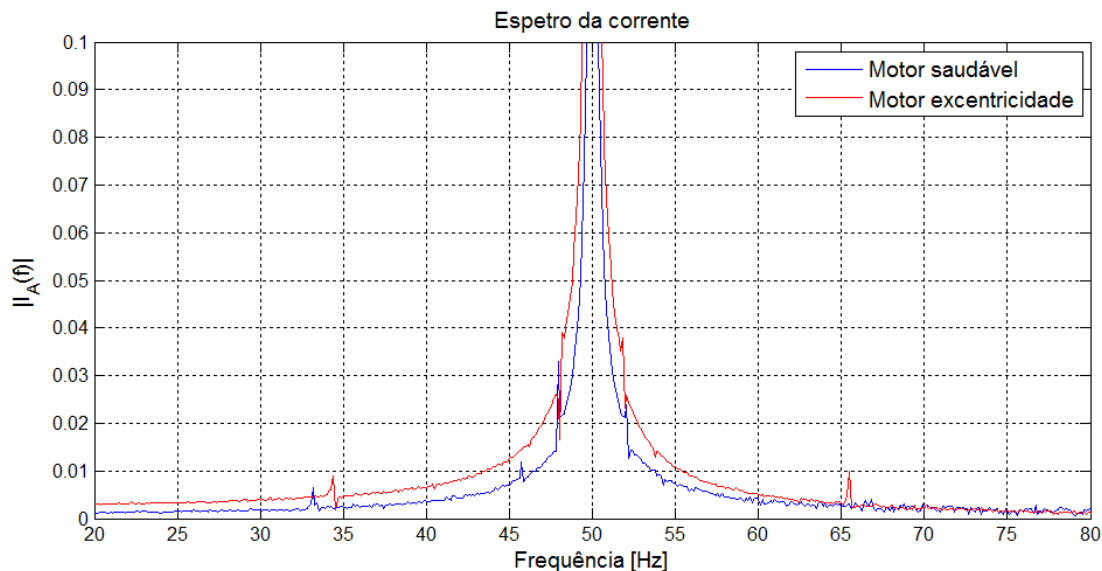


Figura 5.26: Espectro de corrente: comparação entre o motor saudável e o motor com excentricidade.

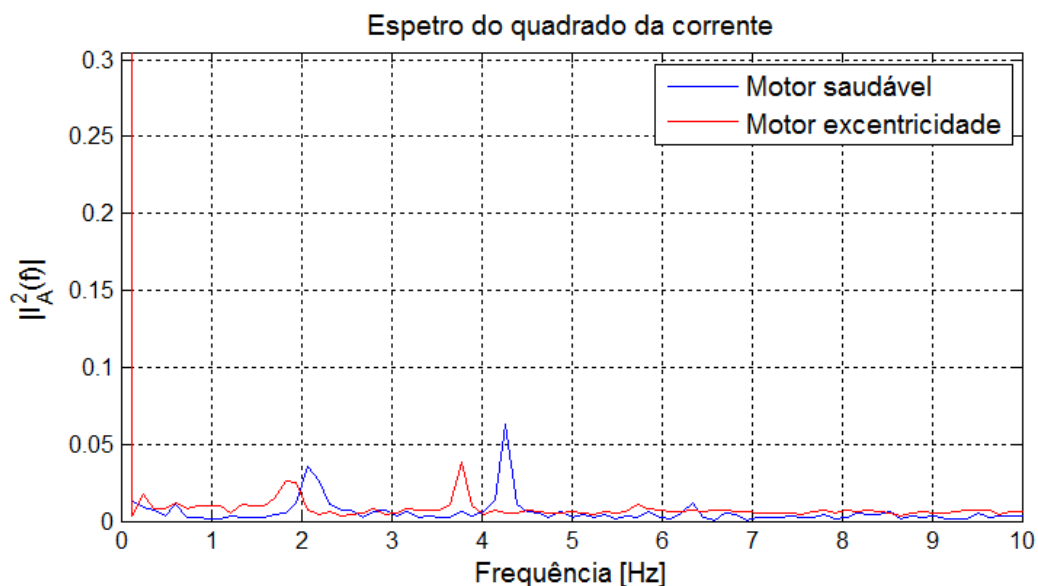


Figura 5.27: Espectro do quadrado da corrente: comparação entre o motor saudável e o motor com excentricidade.

A tabela 5.4 apresenta os IS obtidos pelo sistema para os três ensaios.

Tabela 5.4: Índices de severidade obtidos durante os três ensaios.

	IS estator	IS rotor	IS barras quebradas
Ensaio 1	16.26	4.88	0.68
Ensaio 2	11.81	2.72	0.29
Ensaio 3	13.45	3.05	0.24

A par das análises anteriores os IS obtidos pelo sistema atribuem ao motor com excentricidade o diagnóstico de um motor saudável. A partir dos resultados obtidos conclui-se que o mecanismo desenvolvido não foi suficiente para provocar uma excentricidade no eixo e como tal o diagnóstico efetuado pelo sistema está correto visto a tentativa de avaria ter sido aplicada ao motor saudável.

No decorrer dos três ensaios foi registado o aparecimento de vibrações na estrutura que se agravaram com o aumento do peso aplicado ao disco. Para que futuramente os ensaios de excentricidade possam vir a ser bem sucedidos deverá ser construída uma estrutura fixa ao chão que permita adicionar mais peso ao disco e eliminar o aparecimento de vibrações.

5.4 Alimentação com inversor PWM V/f

Devido á sua simplicidade o V/f é um dos métodos de controlo de velocidade mais utilizados em motores elétricos, contudo, durante o diagnóstico de avarias, a sua utilização introduz alguns obstáculos que não estão presentes numa alimentação de frequência constante. As harmónicas presentes nas tensões de alimentação impostas pelo inversor irão adicionar mais harmónicas ás correntes do estator e consequentemente dificultar a sua análise [6]. De forma a avaliar a robustez do sistema neste tipo de situações, foram repetidos os ensaios realizados anteriormente, alimentando os motores com um inversor PWM V/f.

5.4.1 Motor saudável

Os dados de seguida apresentados foram obtidos a partir das amostras de corrente recolhidas pela unidade TPU M220 com o motor a funcionar em carga.

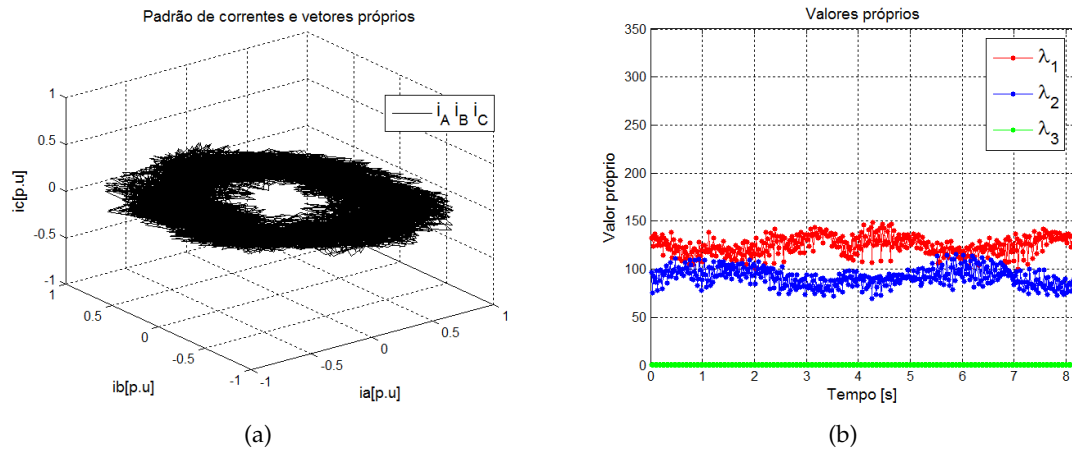


Figura 5.28: (a) Padrão descrito pelas correntes (b) valores próprios do motor saudável alimentado pelo inversor.

Tabela 5.5: IS obtidos para o motor saudável em carga alimentado pelo inversor.

	IS estator	IS rotor	IS barras quebradas
Saudável	20.45	24.37	0.77

Na figura 5.28 observa-se que tal como referido anteriormente as tensões de alimentação do inversor induzem harmónicas nas correntes do estator dificultando assim a sua análise. O padrão das correntes de linha do motor saudável deveria descrever uma circunferência perfeita, ou pelo menos assemelhar-se. Não havendo avaria, os valores próprios permanecem constantes e muito semelhantes. As diferenças observadas devem-se às harmónicas adicionais.

Olhando para a tabela 5.5, os IS obtidos apesar de um pouco mais elevados do que seria esperado, devido à distorção harmónica imposta pelo inversor, apresentam um diagnóstico coerente que vai de encontro ao estado real do motor.

5.4.2 Avaria no estator

Tal como para os ensaios feitos com o auto-transformador, os ensaios do motor com avaria no estator alimentado pelo inversor foram realizados para três níveis de avaria provocados na fase B do motor:

- Nível A - 4Ω
- Nível B - 8Ω
- Nível C - 10Ω

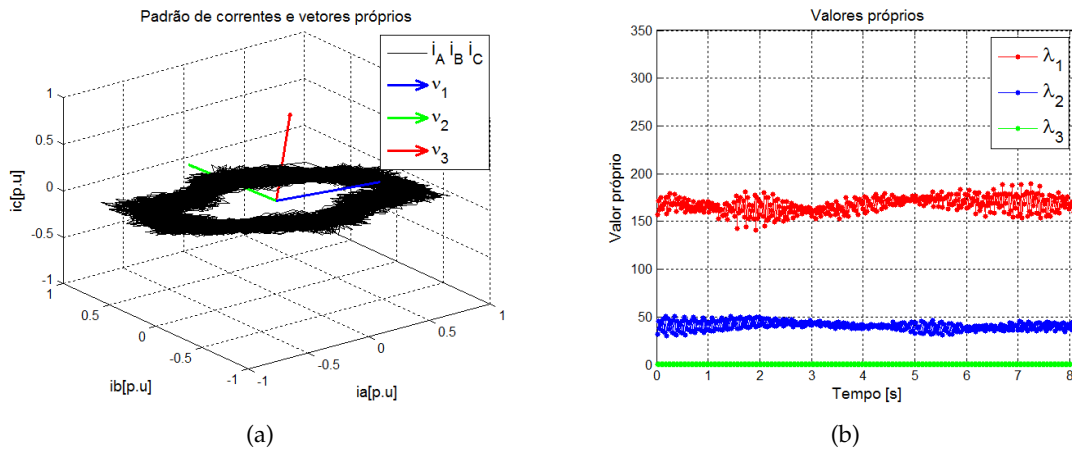


Figura 5.29: (a) Padrão descrito pelas correntes (b) valores próprios do motor com avaria no estator alimentado pelo inversor.

Tabela 5.6: Vetores próprios do motor com avaria no estator alimentado pelo inversor.

	\vec{v}_1	\vec{v}_2	\vec{v}_3
\vec{e}_A	0.3370	-0.7476	0.5723
\vec{e}_B	-0.8118	0.0771	0.5788
\vec{e}_C	0.4769	0.6596	0.5809

Devido á distorção harmónica o padrão apresentado não descreve uma elipse perfeita como seria de esperar. Contudo na figura 5.29 pode observar-se que tal como nos ensaios com o auto-transformador o padrão de correntes é orientado pelo vetor próprio principal \vec{v}_1 .

Analisando os valores das componentes dos vetores próprios dados pela tabel 5.6 verifica-se que é feito uma identificação correta da fase danificada, pois é a componente \vec{e}_B do vetor próprio principal \vec{v}_1 a que apresenta o maior valor em módulo. Também os valores próprios, uma vez que são constantes mas diferentes, indicam uma avaria no estator. Conclui-se portanto que a distorção harmónica, apesar de elevada, não afeta o diagnóstico de avaria no estator feito pelo PCA.

Tabela 5.7: IS obtidos para o motor com avaria no estator em carga alimentado pelo inversor.

	IS estator	IS rotor	IS barras quebradas
Avaria A	52.40	22.18	0.43
Avaria B	68.44	15.06	0.52
Avaria C	72.97	21.91	0.49

Na tabela 5.7 são dados os IS obtidos pelo sistema. Como esperado, os índices do estator "dispararam" relativamente ao valor obtido para o motor saudável e apresentam uma relação de proporcionalidade de acordo com o nível da avaria. Já os índices obtidos para o rotor e para barras quebradas são bastante coerentes pois condizem com os valores obtidos

para o motor sem avaria o que leva a concluir que apesar das harmônicas induzidas pelo inversor o diagnóstico não é comprometido.

5.4.3 Avaria no rotor

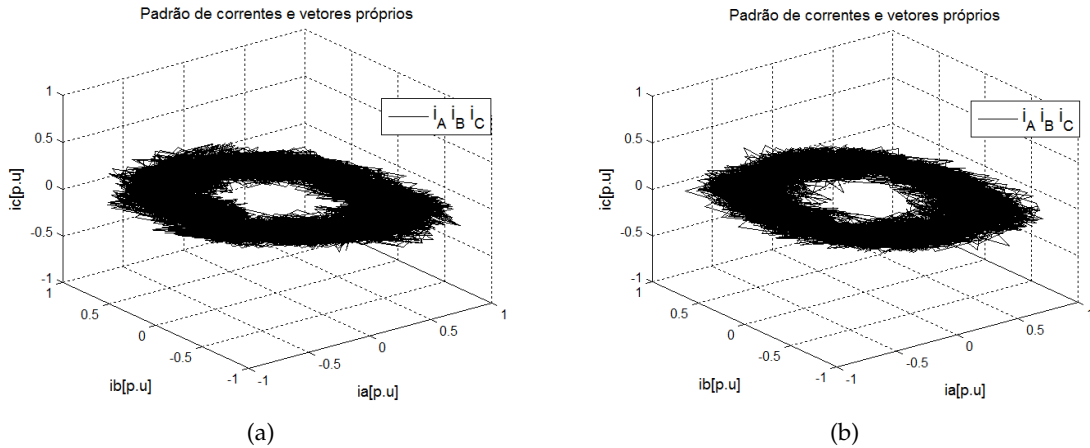


Figura 5.30: Padrão descrito pelas correntes do motor com avaria no rotor alimentado pelo inversor: (a) 2 BQ (b) 9 BQ.

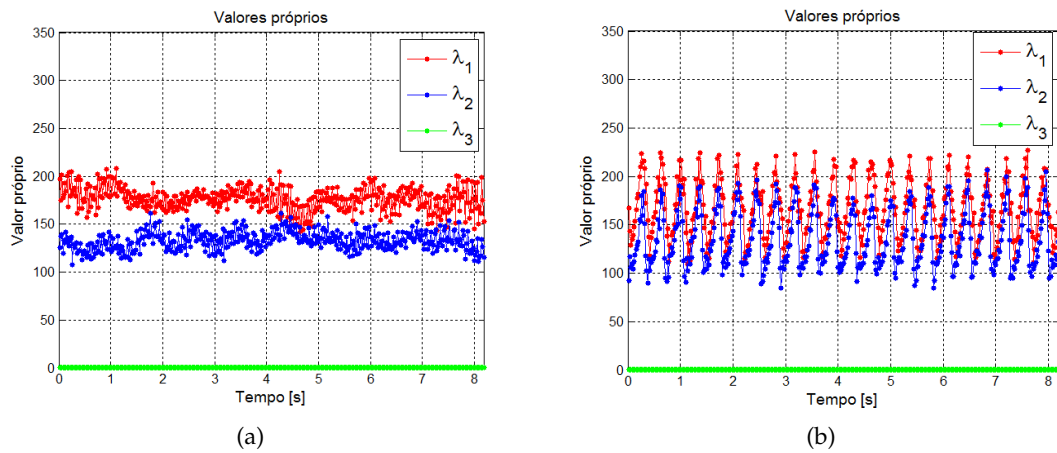


Figura 5.31: Valores próprios do motor com avaria no rotor alimentado pelo inversor: (a) 2 BQ (b) 9 BQ.

Os padrões da figura 5.30 obtidos para os dois casos de avaria no rotor descrevem, tal como esperado, uma forma semelhante a um donut, contudo não é visível a existência de um aumento da espessura do padrão entre o caso de duas e o caso de nove barras quebradas.

Apesar de alguma distorção, a evolução temporal dos valores próprios representada na figura 5.31 mostra, para os dois casos, valores próprios semelhantes mas variantes no tempo, ao contrário do observado na figura 5.28 (b) para o motor saudável onde os valores são sensivelmente iguais mas constantes no tempo. O comportamento dos valores

próprios observado neste ensaio é semelhante ao verificado nos ensaios feitos com o auto-transformador.

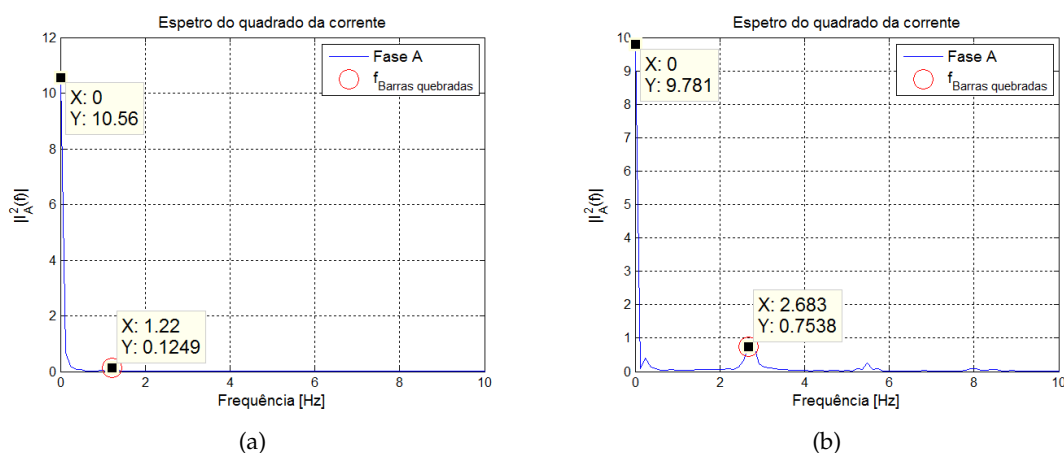


Figura 5.32: Especro do quadrado da corrente do motor com avaria no rotor alimentado pelo inversor: (a) 2 BQ (b) 9 BQ.

É na análise dos espectros de corrente que a alimentação com inversor apresenta maiores obstáculos.

Observem-se os espectros do quadrado da corrente, ilustrados na figura 5.32. Embora, nos dois casos, o sistema tenha conseguido identificar os picos associados às frequências de barras quebradas, verifica-se que os espectros da figura são bastante mais ricos em harmônicas que os obtidos no ensaio com auto-transformador. Este fenómeno faz com que seja mais difícil proceder á identificação das frequências de avaria, principalmente para cargas próximas do vazio mecânico.

Tabela 5.8: IS obtidos para o motor com avaria no rotor em carga alimentado pelo inversor.

	IS estator	IS rotor	IS barras quebradas
2 BQ	20.64	30.33	1.18
9 BQ	17.38	51.19	7.71

Pela análise da tabela 5.8 verifica-se que SDDF fornece uma boa avaliação da condição do estator pois os valores reportados são baixos e coincidentes com os obtidos para o motor saudável.

Relativamente ao diagnóstico da condição do rotor e barras quebradas, os valores obtidos para os dois casos são proporcionais entre si e superiores aos obtidos para os ensaios do motor saudável e com avaria no estator, levando a concluir que o sistema efetua uma análise coerente de ambas as situações.

5.5 Comparação de resultados

De modo a avaliar as diferenças de comportamento entre os dois casos de alimentação do motor e a verificar se de alguma forma comprometem a fiabilidade do diagnóstico efetuado pelo SDDF, comparam-se agora os IS obtidos para as duas situações em condições de carga semelhantes.

Tabela 5.9: Comparação dos IS do estator obtidos para os dois casos em condições semelhantes.

	IS estator Auto-transformador	IS estator Inversor
Saudável	11.73	20.45
Avaria A	54.84	52.40
Avaria B	71.22	68.44
Avaria C	77.35	72.97
2 BQ	4.27	20.64
9 BQ	12.36	17.38

No que diz respeito aos IS do estator, os valores obtidos pelo sistema nos casos de avaria são bastante semelhantes em ambas as situações. No sentido inverso, os valores obtidos quer para o motor saudável, quer para o motor com avaria no rotor apresentam uma diferença algo significativa entre si, contudo, as diferenças observadas não vão afetar o diagnóstico do sistema devido á distância considerável que apresentam relativamente aos valores de referência para avaria no estator.

Tabela 5.10: Comparação dos IS do rotor obtidos para os dois casos em condições semelhantes.

	IS rotor Auto-transformador	IS rotor Inversor
Saudável	6.19	24.37
Avaria A	6.08	22.18
Avaria B	3.77	15.06
Avaria C	4.53	21.91
2 BQ	7.44	30.33
9 BQ	30.30	51.19

Devido ás harmónicas induzidas pelas tensões do inversor nas correntes, os IS do rotor obtidos para esta situação apresentam um aumento acentuado face aos valores obtidos durante os ensaio realizados com o auto-transformador. Apesar disso, ambos os conjuntos de valores são coerentes e apresentam uma relação de proporcionalidade entre os casos de duas e nove barras quebradas. Conclui-se portanto que para as duas situações de alimentação, o sistema necessita de um valor de limite de avaria distinto.

Tabela 5.11: Comparação dos IS de barras quebradas obtidos para os dois casos em condições semelhantes.

	IS barras quebradas Auto-transformador	IS barras quebradas Inversor
Saudável	0.40	0.77
Avaria A	0.37	0.43
Avaria B	0.28	0.52
Avaria C	0.13	0.49
2 BQ	1.41	1.18
9 BQ	7.25	7.71

Apesar das dificuldades encontradas na detecção das frequências de barras quebradas durante os ensaios feitos com o inversor, os valores dos IS obtidos nos dois casos são bastante semelhantes e em ambos os casos os valores mantêm-se proporcionais relativamente às avarias de duas e nove barras quebradas. Pode portanto concluir-se que tal como para o diagnóstico de avaria no estator, no diagnóstico de barras quebradas o sistema não apresenta qualquer tipo de limitação relativamente aos valores de referência.



CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

6.1 Conclusão

O motor de indução é cada vez mais uma ferramenta essencial da indústria moderna, estando presente em setores como o petrolífero e o nuclear onde a margem de erro é praticamente nula. Sendo a indústria um meio cada vez mais exigente é fundamental garantir que uma manutenção contínua e de qualidade assegure o bom funcionamento dos seus equipamentos. Contudo uma manutenção de qualidade exige mão de obra e a interrupção dos trabalhos, o que pode dar origem a prejuízo financeiro. Na tentativa de minimizar esta situação durante os últimos anos têm vindo a ser propostos e desenvolvidos vários métodos de manutenção preventiva baseados na deteção de avarias.

Querendo dar continuidade aos trabalhos já realizados nas áreas da manutenção preventiva e do diagnóstico de avarias esta dissertação baseou-se no desenvolvimento de um modelo de deteção e diagnóstico de avarias em tempo real para motores de indução, baseado num referencial de correntes tridimensional. Além da deteção precoce de avarias, este sistema tem como principal objetivo a redução de custos e de mão de obra associada ao processo de manutenção dos equipamentos. Uma vez que cerca de 30% das avarias identificadas em motores de indução são avarias elétricas, este trabalho focou-se essencialmente nas avarias dos enrolamentos do estator e das barras condutoras do rotor.

O sistema desenvolvido foi implementado num relé de proteção produzido pela EFACEC, a TPU M220, que através das suas entradas analógicas fornece ao sistema um determinado número de amostras das correntes de linha do motor. Recorrendo a um método estatístico de computação de dados, designado PCA, este modelo baseia-se na análise de padrões de correntes, de vetores e de valores próprios a partir dos quais são calculados os índices de severidade de cada tipo de avaria. O sistema efetua também a análise do espectro do quadrado da corrente de modo a detetar avarias nas barras do rotor. Neste sistema é esperado que para um motor sem avarias o seu padrão de corrente descreva uma circunferência perfeita centrada na origem do plano xyz . Para uma avaria no estator é esperado que o padrão descreva uma forma elíptica orientada pelo vetor próprio principal, variando de acordo com a fase defeituosa. Uma avaria no rotor, devido à evolução temporal dos seus

valores próprios, deverá descrever um padrão semelhante a um donut.

Os os ensaios dos motores foram realizados para dois tipos de alimentação, primeiro os motores foram alimentados a partir de um auto-transformador e depois por um inversor PWM U/f. Nos motores utilizados foram provocadas artificialmente as avarias que se pretendia estudar.

Nos ensaios efetuados para o motor saudável com o auto-transformador verificou-se que contrariamente ao esperado, o padrão de correntes descreve uma forma semelhante a uma estrela hexagonal, tal deve-se á distorção harmónica causada pela menor qualidade de construção do motor. Apesar das alterações de forma do padrão de corrente concluiu-se que o sistema efetua um diagnóstico coerente que condiz com estado do motor. O mesmo acontece para os ensaios do motor sem avaria realizados com o inversor, apesar de se verificar ainda mais distorção harmónica devido ás tensões de alimentação do inversor, o sistema continua a fazer um diagnóstico correto e eficaz da situação.

Na deteção de avarias do estator, os índices de severidade obtidos levaram a concluir que para ambas as situações de alimentação o sistema efetua um diagnóstico fiável da condição do motor. Verificou-se também que os valores dos IS obtidos para avarias de gravidade diferente apresentam uma relação de proporcionalidade entre si. Relativamente ao padrão descrito pelas correntes, apesar de não ser elíptico segue a orientação dada pelo vetor próprio principal. Também a fase danificada pode ser corretamente identificada a partir dos valores das componentes do vetor próprio principal.

Na presença de uma avaria no rotor, os padrões de corrente obtidos para os ensaios realizados apresentaram uma espessura bastante superior aos restantes casos, que evoluía de acordo com a gravidade da avaria. Nos ensaios realizados com o inversor devido á elevada quantidade de harmónicas induzidas nas correntes do estator pelas tensões de alimentação do inversor, os padrões apresentaram uma espessura bastante superior. De acordo com os índices de severidade do rotor, o sistema efetua um diagnóstico coerente para o caso de nove barras quebradas mas não para o caso de duas barras quebradas. Contudo o índice de severidade de barras quebradas, calculado através da análise do espetro do quadrado da corrente, corrige o diagnóstico anterior e apresenta uma evolução condizente com o número de barras danificadas.

Depois de analisados todos os casos verificou-se que para todos eles é feito um diagnóstico coerente da condição do motor, por isso conclui-se que os resultados apresentados pelo sistema são bastante satisfatório. De uma maneira geral considera-se que os objetivos propostos no início desta dissertação foram atingidos com sucesso.

6.2 Sugestões de trabalho futuro

Sendo a detecção de avarias uma área bastante sensível onde um pequeno erro de diagnóstico pode comprometer todo o processo em que está inserido, é essencial que os sistemas desenvolvidos sejam testados ao limite de modo a que toda as suas limitações sejam identificadas. Para que futuramente o sistema desenvolvido nesta dissertação possa ser melhorado e eventualmente integrado no meio industrial sugerem-se algumas ideias para trabalho futuro:

1. Repetição dos ensaios utilizando motores de melhor qualidade
2. Repetição dos ensaios para valores de carga mais próximos do vazio mecânico
3. Repetição dos ensaios de avaria no rotor para motores com um número intermédio de barras quebradas (de preferências entre as duas e as nove barras quebradas)
4. Realização exaustiva dos ensaios utilizando um inversor que permita uma maior e melhor variação da carga do motor
5. Construção de um suporte fixo ao chão para que permita eliminar as vibrações e simular convenientemente uma excentricidade no motor

À parte de todas estas sugestões, propõe-se ainda que a avaria no estator seja provocada diretamente nos enrolamentos do motor. Apesar da avaria provocada com resistências variáveis ter apresentado resultados bastante positivos, trata-se apenas de uma aproximação.

REFERÊNCIAS

- [1] J. G. N. E. I. Ahmed R. Supangat e W. L. Soong. "A Baseline Study for On-Line Condition Monitoring of Induction Machines". *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)* (2004), pp. 26–29.
- [2] L. Wang e R. X. Gao. "Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing". *Springer*, 2006 ().
- [3] P. Tavner. "Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines". *IET* (2008).
- [4] M. A. C. Marques. "On-line system for faults detection in induction motors based on PCA". Tese de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [5] A. G. Águas. "Otimização de um sistema online de deteção de falhas em motores de indução". Tese de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [6] J. M. V. Fernão Pires e A. Pires. "Eigenvector/eigenvalue analysis of a 3D current referential fault detection and diagnosis of an induction motor". *Energy Conversion and Management* (2009).
- [7] Halliday e Resnick. *Fundamentos de Física - Electromagnetismo*. 8ª ed. Vol. 3. 2007.
- [8] M. V. Neves. *Apontamentos da cadeira de Electrotecnia Teórica - Máquina de Indução*. 2007.
- [9] W. T. T. e M. Fenger. "Current signature analysis to detect induction motor faults". *Industry Applications Magazine, IEEE* 7.4 (2001), pp. 26–34.
- [10] B. A. H. Y. C. "Increased Efficiency versus Increased Reliability". *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 14, no. 1, pp. 29 - 36, January/February 2008 ().
- [11] E. L. O. E. P. Cornell e J. C. Appiarius. "Improved motors for utility applications - volume 1". *EPRI* (1982).
- [12] "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations - Parts I, II and III". *IEEE Trans. Ind. Appl.*, no. 4, pp. 853–864 (1985).
- [13] T. A. Lipo. "Introduction to AC Machine Design" (2007).
- [14] A. H. B. e G. C. Soukup. "Cause and analysis of stator and rotor failures in 3-phase squirrel cage induction motors". *Pulp and Paper Industry Technical Conference , Conference Record of 1991 Annual. IEEE*. 1991, pp. 22–42.

- [15] P. Gnacinski. "Windings temperature and loss of life of an induction machine under voltage unbalance combined with over-or undervoltages". *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 23.2 (2008), pp. 363–371.
- [16] J. F. e H Ebrahimpour. "Precise derating of three-phase induction motors with unbalanced voltages". *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005* Vol. 1. IEEE. 2005 (), pp. 485–491.
- [17] B. L. e. W. F. J Penman H. Sedding. "Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors". *Energy conversion, IEEE transactions on* 9.4 (1994), pp. 652–658.
- [18] C. T. A. Bellini F. Filippetti e G. A. Capolino. "Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines". *IEEE Trans. Ind. Electron.* Vol. 55. No. 12. 2008, pp. 4109–4126.
- [19] P. Vas. "Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines". *Oxford University Press on Demand*, 1993.
- [20] R. P. Assunção. "Detecção Automática de Avarias em Motores de Indução". Tese de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [21] T. A. Harris. *Rolling Bearing Analysis*. John Wiley & Sons Inc, 1967.
- [22] SNR. *O Diagnóstico Perito SNR: Análise e Preconizações para Optimizar a Vida dos Rolamentos*. 2003. URL: <http://www.ntn-snr.com/industry/es/es-es/file.cfm/dt10br.pdf?contentID=1639>.
- [23] R. L. Schiltz. "Forcing frequency identification of rolling element bearings". *Sound and vibration* Vol. 24.No. 5 (1990), pp. 16–19.
- [24] A. H. Bonnett. "Root cause AC motor failure analysis with a focus on shaft failures". *Industry Applications, IEEE Transactions.* Vol. 36. No. 5. 2000, pp. 1435–1448.
- [25] G. R. B. José M. Bossio e C. H. D. Angelo. "Angular Misalignment in Induction Motors with Flexible Coupling". *IEEE* (2009).
- [26] Piotrowski. *Shaft Alignment Handbook*. Third Edition. 1995.
- [27] S. B. L. S. Nandi T. C. Ilamparithi e D. Hyun. "Detection of Eccentricity Faults in Induction Machines Based on Nameplate Parameters". *IEEE Trans. Ind. Electron.* Vol. 58. No. 5. 2011, pp. 1673–1683.
- [28] U. Werner. "FE-analysis of a soft-mounted two-pole induction motor regarding relative shaft vibrations caused by static rotor eccentricity". *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. Sorrento, Itália, 2012, pp. 1448–1455.
- [29] F. C. D. GUO e D. Chen. "The unbalanced magnetic pull and its effects on vibration in a three-phase generator with eccentric rotor". *Journal of Sound and Vibration* Vol. 54.No. 2 (2002), pp. 297–312.

-
- [30] Q. W. X. Li e S. Nandi. "Performance Analysis of a Three-Phase Induction Machine With Inclined Static Eccentricity". *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 2, pp.531–541 (2007).
- [31] B. Lundqvist. "100 years of relay protection, the Swedish ABB relay history". *ABB Automation Products, Substation Automation Division* ().
- [32] A. Abdelmoumene e H. Bentarzi. "A review on protective relays developments and trends". *Journal of Energy in Southern Africa, Vol 25 No 2* (2014).
- [33] *Siemens*. URL: <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/protection/motor-and-generator-protection/pages/siprotec-7sk80.aspx>.
- [34] *ABB*. URL: <http://new.abb.com/medium-voltage/distribution-automation/numerical-relays/motor-protection-and-control/motor-protection-rem610>.
- [35] *Schneider Electric*. URL: <http://www.schneider-electric.com/products/ww/en/4700-protection-relays-by-range/4715-micom-px20-series/60752-micom-p22x/>.
- [36] *General Electrics*. URL: <https://www.gedigitalenergy.com/multilin/catalog/M60.htm>.
- [37] *EFACEC*. URL: http://www.efacec.pt/PresentationLayer/efacec_produto_01.aspx?idioma=1&area=2&idProduto=535.
- [38] C. J. Cardoso AJM Cruz SMA e S. ES. "Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by Park's vector approach". *IEEE industry applications conference vol. 1* (1995).
- [39] J. F. M. V. F. Pires M. Kadivonga e A. J. Pires. "Motor square current signature analysis for induction motor rotor diagnosis". *Measurement* 46.2 (2013), 942–948.



ANEXO

```
1
2 %% Fault detection and diagnosis system for induction motors,in real-time,
   based on a 3D currents referential.
3 %% Copyright(c) Filipe Dionisio.
4 %% All rigths reserved.
5 %% Distributions are not allowed to source code or binary forms, with or without
   modifications.
6 %% THIS IS UNPUBLISHED PROPRIETARY SOURCE CODE OF Filipe Dionisio.
7
8 clc
9 clear all
10 close all
11
12 %%%%%%%%% CONFIGURATION PARAMETERS%%%%%%%%
13
14 f=50;
15 Fa=1e3;
16 slip = 5;
17
18 t_periodo = 1/f;
19 Ta = 1/Fa;
20 k_periodo = t_periodo/Ta;
21 t = 0:Ta:(8200-1)*Ta;
22 w=2*pi*f;
23
24 %%%%%%%%%
25
26 fileID = fopen('healty67%.txt','r');
27 formatSpec = '%f';
28 ia = fscanf(fileID,formatSpec,8200);
29 ib = fscanf(fileID,formatSpec,8200);
30 ic = fscanf(fileID,formatSpec,8200);
31 fclose(fileID);
32
33
34 length(ia)
35 length(ib)
36 length(ic)
```

```

37
38 norm(1)= max(ia);
39 norm(2)= max(ib);
40 norm(3)= max(ic);
41
42 normalization = max(norm);
43
44 %%PLOTS
45 figure(1)
46 plot(t,ia,'r','Linewidth',2);
47 hold all
48 plot(t,ib,'b','Linewidth',2);
49 plot(t,ic,'g','Linewidth',2);
50 title('Correntes do estator','FontSize',12);
51 AX = legend('i_A','i_B','i_C');
52 xlabel('Tempo[s]','FontSize',12); ylabel('Amplitude[A]','FontSize',12);
53 xlim([0 4*t_periodo]);
54 FigHandle = figure (1);
55 set(FigHandle, 'Position', [400, 400, 900, 500]);
56 LEG = findobj(AX,'type','text');
57 set(LEG,'FontSize',14)
58 set(gcf, 'color', [1 1 1])
59 grid on
60
61 ia2=0;
62 ib2=0;
63 ic2=0;
64 aux = 0;
65
66
67 maxSamples=length(ia);
68 Periodos=floor(maxSamples/k_periodo);
69 interval=k_periodo;
70 tEigen=0:interval*Ta:Periodos*interval-Ta-interval*Ta;
71
72 for index=1:k_periodo:(length(ia))
73     for i=1:k_periodo
74         ia2(i)=ia(i+index-1);
75         ib2(i)=ib(i+index-1);
76         ic2(i)=ic(i+index-1);
77     end
78
79     aux=aux+1;
80
81     S = [ia2' ib2' ic2'];
82     E = (S'*S);
83     [V,D] = eig(E);
84     D = diag(D);
85
86     eigen1_array(aux)=D(3,1);

```

```

87     eigen2_array(aux)=D(2,1);
88     eigen3_array(aux)=D(1,1);
89     eigenVector1x(aux)=V(1,3);%PrincipalEigenvector(xcoord.)
90     eigenVector1y(aux)=V(2,3);%PrincipalEigenvector(ycoord.)
91     eigenVector1z(aux)=V(3,3);%PrincipalEigenvector(zcoord.)
92     eigenVector2x(aux)=V(1,2);%SecondaryEigenvector(xcoord.)
93     eigenVector2y(aux)=V(2,2);%SecondaryEigenvector(ycoord.)
94     eigenVector2z(aux)=V(3,2);%SecondaryEigenvector(zcoord.)
95     eigenVector3x(aux)=V(1,1);%ThirdEigenvector(xcoord.)
96     eigenVector3y(aux)=V(2,1);%ThirdEigenvector(ycoord.)
97     eigenVector3z(aux)=V(3,1);%ThirdEigenvector(zcoord.)
98 end
99
100 for j=1:length(ia)
101     ia_norm(j)=ia(j)/normalization;
102     ib_norm(j)=ib(j)/normalization;
103     ic_norm(j)=ic(j)/normalization;
104 end
105 V
106
107 %%%%% Load Variation %%%%%%%
108
109 num_interv = 5;
110 interv = length(eigen1_array)/num_interv;
111 n=1;
112 for i=1:interv:length(eigen1_array),
113     vMed(n)=mean(eigen1_array(i:interv+i-1));
114     n=n+1;
115 end
116
117
118 %%Best Interval for Diagnosis %%
119 minVarPos = find(vMed==min(vMed));
120 int1 = (minVarPos-1)*interv;
121 int2 = minVarPos*interv;
122
123 if(minVarPos==1)
124     int1=1;
125     int2=minVarPos*interv+1;
126 end
127
128 if(var(vMed)<=5) %If stationary currents
129 %%%FFT square current
130     L = 8200;
131     spectrum = fft(ia(1:L),L)/L;
132     spectrum_2 = fft(ia(1:L).^2,L)/L;
133     fi2 = Fa/2* linspace(0,1,L/2+1);
134 end
135
136

```

```

137 res = Fa/L;
138 int = round((slip*2)/res);
139 posi2 = 0;
140 maxi2 = 0;
141 for i=2:1:int
142     if(maxi2<abs(spectrum_2(i))),
143         maxi2=abs(spectrum_2(i));
144         posi2=i;
145     end
146 end
147
148 SIst = (1- (mean(eigen2_array(int1:int2))/mean(eigen1_array(int1:int2))))*100
149 SIrt = ((max(eigen1_array(int1:int2))-min(eigen1_array(int1:int2)))/max(
    eigen1_array(int1:int2)))*100
150 SIbq = ((2*abs(spectrum_2(posi2)))/(2*abs(spectrum_2(1))))*100
151
152
153 %%%%%%%%%% CURRENT PATTERN
154
155 figure(2)
156
157 plot3(ia_norm,ib_norm,ic_norm,'k');
158
159 title('Padrao de correntes','FontSize',12);
160 AX = legend('i_A i_B i_C');
161 xlabel('ia[p.u]','FontSize',12);ylabel('ib[p.u]','FontSize',12);zlabel('ic[p.u]
    ','FontSize',12)
162 xlim([-1 1]); ylim([-1 1]); zlim([-1 1]);
163 LEG = findobj(AX,'type','text');
164 set(LEG,'FontSize',14)
165 set(gcf, 'color', [1 1 1])
166 grid on
167
168
169 %%%%%%%%%% EIGEN VECTORS
170
171 figure(3)
172
173 for i=1:410
174     quiver3(0,0,0,eigenVector1x(i),eigenVector1y(i),eigenVector1z(i),'b','
        LineWidth',1);
175     hold all
176     quiver3(0,0,0,eigenVector2x(i),eigenVector2y(i),eigenVector2z(i),'g','
        LineWidth',1);
177     quiver3(0,0,0,eigenVector3x(i),eigenVector3y(i),eigenVector3z(i),'r','
        LineWidth',1);
178 end
179
180 plot3(0,0,0,'k');
181

```

```

182 title('Vetores proprios','FontSize',12);
183 AX = legend('\nu_1','\nu_2','\nu_3');
184 xlabel('ia[p.u]','FontSize',12);ylabel('ib[p.u]','FontSize',12);zlabel('ic[p.u]','FontSize',12)
185 xlim([-1 1]); ylim([-1 1]); zlim([-1 1]);
186 LEG = findobj(AX,'type','text');
187 set(LEG,'FontSize',14)
188 set(gcf,'color',[1 1 1])
189 grid on
190
191 %%%%%%%%%%% EIGEN VALUE
192
193 figure(4)
194
195 plot(tEigen,eigen1_array,'.-r','MarkerSize',12);
196 hold all
197 plot(tEigen,eigen2_array,'.-b','MarkerSize',12);
198 plot(tEigen,eigen3_array,'.-g','MarkerSize',12);
199 title('Valores proprios','FontSize',12);
200 AX=legend('\lambda_1','\lambda_2','\lambda_3');
201 xlabel('Tempo [s]','FontSize',12);ylabel('Valor proprio','FontSize',12)
202 xlim([0 max(tEigen)]);
203 ylim([0 300]);
204 LEG = findobj(AX,'type','text');
205 set(LEG,'FontSize',16)
206 set(gcf,'color',[1 1 1])
207 grid on
208
209
210 %%%%%%%%%%% FFT
211
212 figure(5)
213
214 plot(fi2,2*abs(spectrum(1:L/2+1)))
215 title('Espectro da corrente','FontSize',12);
216 AX = legend('Fase A','Amplitude maxima');
217 xlabel('Frequencia [Hz]','FontSize',12);ylabel('|I_A(f)|','FontSize',12);
218 xlim([(1-2*(slip/100))*f (1+2*(slip/100))*f]);
219 set(gca,'XTick',[45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55]);
220 LEG = findobj(AX,'type','text');
221 set(LEG,'FontSize',12)
222 set(gcf,'color',[1 1 1])
223 grid on;
224
225
226 %%%%%%%%%%% SQUARE FFT
227
228 figure(6)
229
230 plot(fi2,2*abs(spectrum_2(1:L/2+1)))

```

```
231 title('Espetro do quadrado da corrente','FontSize',12);
232 AX = legend('Fase A');
233 xlabel('Frequencia [Hz]','FontSize',12);ylabel('|I_A^2(f)|','FontSize',12);
234 xlim([0 2*slip]);
235 ylim([0 16*abs(spectrum_2(posi2))]);
236 LEG = findobj(AX,'type','text');
237 set(LEG,'FontSize',12)
238 set(gcf,'color',[1 1 1])
239 grid on;
```

